

# Conceção de uma transmissão industrial por engrenagens de 375 kW com “power split”

**Autor**

*Mauro Filipe Rodrigues Domingues*

**Dissertação de Mestrado**

Orientador:

Prof. José António dos Santos Almacinha

Co-orientador:

Prof. Jorge Humberto Oliveira Seabra



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Porto, Junho de 2019

*Página intencionalmente em branco*

## Resumo

A utilização de mecanismos de elevada potência, dotados de maiores rendimentos e sofisticação, é cada vez maior na indústria. Torna-se assim, necessário, desenvolver sistemas que permitam acoplar o sistema motor ao sistema de produção, com os requisitos pretendidos.

Com esta dissertação pretende-se conceber e desenhar um redutor de velocidade de alta potência, 375 kW, com uma velocidade de entrada de 1000 rpm e de saída de 60 rpm. Este projeto foi desenvolvido implementando o conceito e forma construtiva de “*power split*”. A otimização e o avanço deste sistema são os pontos com maior realce no dimensionamento.

Este projeto inicia-se com uma pesquisa de contextualização de conceitos e identificação de trabalho realizado na área, seguida de uma recolha de informação importante sobre os parâmetros que caracterizam cada um dos componentes do redutor, de modo a obter uma solução otimizada.

O dimensionamento da maioria dos componentes do redutor foi realizado através da combinação dos softwares, *KISSsys*<sup>®</sup> e *KISSsoft*<sup>®</sup>, enquanto o dos restantes se realizou com base na utilização de expressões da Mecânica dos Sólidos e de Órgãos de Máquinas. O dimensionamento do redutor realizou-se gradualmente, começando-se pelas engrenagens e respetiva otimização, passando pela análise energética do conjunto e dimensionamento dos veios, e terminando com a arquitetura do elemento suporte de todos os componentes, o cárter.

O projeto termina com a realização dos desenhos de conjunto em representação ortográfica e em vista explodida do redutor projetado e dos desenhos de definição de cada um dos seus componentes. Nesta etapa, desenvolveu-se um estudo sobre a cotação e toleranciamento a aplicar a cada componente, de forma a simular o funcionamento e montagem deste mecanismo.

*Página intencionalmente em branco*



# Design of 375 kW "power split" industrial gear transmission

## Abstract

The use of high speed mechanisms endowed with greater yields and sophistication is increasing in industry. So, it is necessary to develop systems that allow the motor system to be joined to the production system, with the requirements needed.

This dissertation intends to conceive and design a high power gear transmission of 375kW, with an input speed of 1000 rpm and an output speed of 60 rpm. This project was developed by implementing the concept and constructive form of a power split. The optimization and the clutter of this system are the points with greater emphasis in the sizing.

This project begins with a research of contextualization of concepts and identification of work performed in the area, followed by the gathering of important information about the parameters that characterizes each of the components of the gearbox, in order to obtain an optimized solution.

The sizing of most of the components of the gear unit was done through the combination of software KISSsys and KISSsoft, while the rest was based on the use of expressions from Solids Mechanics and Machine Elements. The sizing of the reducer was gradually done, starting with the gears and respective optimization, followed by the efficiency analysis of the set and sizing of the shafts and finishing with the architecture of the support element of all components, the housing.

The project ends with the creation of the assembly drawings and exploded view of the designed gearbox and the definition drawings of each of its components. At this stage, a study was developed on the sizing and tolerance to be applied to each component, in order to simulate the operation and the assembly of this mechanism.

*Página intencionalmente em branco*

## Agradecimentos

Agradecer à minha família, em particular aos meus pais e à minha irmã, pelos incentivos dados às minhas decisões e pelo apoio constante e o empenho que manifestaram nesta etapa final. Não posso deixar de agradecer o esforço que fizeram para que a minha formação académica se tornasse possível.

Em conjunto, agradeço aos meus orientadores, Prof. Jorge H. O. Seabra e Prof. José A. Almacinha, por toda a permanente disponibilidade na orientação e incentivos dados, bem como pelos desafios propostos ao longo do desenvolvimento desta dissertação. Sem esta ajuda, este trabalho não seria concretizado.

Deixo também uma palavra de agradecimento aos restantes elementos do CETRIB (Unidade de Tribologia, Vibrações e Manutenção Industrial), pelo agradável acolhimento e ajuda prestada na resolução de alguns problemas.

Agradeço aos técnicos das oficinas, principalmente ao Sr. Domingos Carvalho, pelo esclarecimento de dúvidas ligadas à conceção de alguns componentes.

Deixo aqui, também, um agradecimento especial aos Profs. Rui Neto, pela informação transmitida sobre fundição e pelas indicações fornecidas sobre alterações a realizar, e ao Prof. Luís A. Ferreira pela sua disponibilidade e ajuda.

Não menos importante, foi a ajuda e apoio dos meus amigos e namorada, na realização deste projeto, aos quais dirijo palavras de gratidão e sucesso para o futuro.

*Página intencionalmente em branco*

# Sumário

|  |            |
|--|------------|
| <b>Resumo</b>  | <b>i</b>   |
| <b>Abstract</b>  | <b>iii</b> |
| <b>Agradecimentos</b>  | <b>v</b>   |
| <b>Palavras-chave</b>  | <b>xix</b> |
| <b>Siglas</b>  | <b>xix</b> |
| <b>Símbolos e nomenclatura</b>                                     | <b>xx</b>  |
| <br>   |            |
| <b>1 Introdução</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1 Enquadramento do projeto e motivação . . . . .                 | 2          |
| 1.2 Objetivos . . . . .  | 2          |
| 1.3 Metodologia do projeto . . . . .                               | 3          |
| 1.4 Estrutura da dissertação . . . . .                             | 4          |
| <br>   |            |
| <b>2 Redutor de Velocidade</b>                                     | <b>5</b>   |
| 2.1 Contextualização . . . . .                                     | 5          |
| 2.2 Redutor de 350 kW . . . . .                                    | 9          |
| <br>   |            |
| <b>3 Dimensionamento das Engrenagens</b>                           | <b>11</b>  |
| 3.1 Dados técnicos . . . . .                                       | 11         |
| 3.2 Software . . . . .   | 14         |
| 3.3 Configurações com dentado helicoidal simples . . . . .         | 17         |
| 3.3.1 Resultados e comentários . . . . .                           | 19         |
| 3.4 Configurações com dentado helicoidal simples e duplo . . . . . | 24         |
| 3.4.1 Resultados e comentários . . . . .                           | 24         |
| 3.5 Análise dos esforços nos apoios . . . . .                      | 27         |
| 3.6 Dimensionamento dos veios e rolamentos . . . . .               | 29         |
| 3.6.1 Dimensionamento dos veios . . . . .                          | 29         |
| 3.6.2 Dimensionamento dos rolamentos . . . . .                     | 31         |
| <br>   |            |
| <b>4 Otimização das Engrenagens</b>                                | <b>33</b>  |
| 4.1 Lubrificação . . . . .   | 33         |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.1.1    | Tipo de lubrificação . . . . .                       | 34        |
| 4.2      | Modificação do dentado . . . . .                     | 36        |
| 4.3      | Redução de massa . . . . .                           | 38        |
| 4.4      | Análise energética . . . . .                         | 41        |
| 4.4.1    | Semiproduto . . . . .                                | 41        |
| 4.4.2    | Produto final . . . . .                              | 46        |
| 4.4.3    | Rendimento do produto final . . . . .                | 47        |
| <b>5</b> | <b>Arquitetura Final</b>                             | <b>49</b> |
| 5.1      | Veios . . . . .                                      | 49        |
| 5.1.1    | Chavetas . . . . .                                   | 51        |
| 5.1.2    | Estriados . . . . .                                  | 54        |
| 5.1.3    | Flecha . . . . .                                     | 57        |
| 5.1.4    | Fadiga . . . . .                                     | 60        |
| 5.2      | Rolamentos . . . . .                                 | 65        |
| 5.2.1    | Pré-carga . . . . .                                  | 69        |
| 5.3      | Cárter . . . . .                                     | 70        |
| 5.3.1    | Processo de fabrico . . . . .                        | 71        |
| 5.3.2    | Material . . . . .                                   | 73        |
| 5.3.3    | Análise estrutural . . . . .                         | 74        |
| 5.4      | Postiço . . . . .                                    | 78        |
| 5.4.1    | Análise estrutural . . . . .                         | 80        |
| 5.5      | Tampas . . . . .                                     | 83        |
| 5.5.1    | Análise estrutural . . . . .                         | 85        |
| 5.6      | Elementos de fixação e centragem . . . . .           | 86        |
| 5.6.1    | Parafusos . . . . .                                  | 86        |
| 5.6.2    | Pinos de centragem . . . . .                         | 91        |
| 5.6.3    | Anéis elásticos . . . . .                            | 91        |
| 5.7      | Casquilhos espaçadores . . . . .                     | 93        |
| 5.8      | Chanfros, raios de concordância e ranhuras . . . . . | 94        |
| 5.9      | Outros elementos . . . . .                           | 96        |
| 5.9.1    | Bujões . . . . .                                     | 96        |
| 5.9.2    | Retentores . . . . .                                 | 98        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>6</b> | <b>Desenhos</b>  | <b>99</b>  |
| 6.1      | Desenhos de definição e de conjunto . . . . .  | 99         |
| 6.2      | Toleranciamentos . . . . .   | 99         |
| 6.2.1    | Engrenagens . . . . .  | 100        |
| 6.2.2    | Chavetas . . . . .   | 103        |
| 6.2.3    | Estriados . . . . .  | 104        |
| 6.2.4    | Rolamentos . . . . .   | 105        |
| 6.2.5    | Cárter . . . . .   | 106        |
| 6.2.6    | Postiço . . . . .  | 107        |
| 6.2.7    | Tampas . . . . .   | 108        |
| 6.2.8    | Anéis elásticos . . . . .  | 110        |
| 6.2.9    | Casquilho Espaçador . . . . .  | 112        |
| 6.2.10   | Retentores . . . . .   | 113        |
| 6.2.11   | Veios . . . . .  | 113        |
| <b>7</b> | <b>Conclusões e trabalhos futuros</b>  | <b>119</b> |
| 7.1      | Conclusões . . . . .   | 119        |
| 7.2      | Trabalhos futuros . . . . .  | 120        |
|          | <b>Referências</b>   | <b>121</b> |
| <b>A</b> | <b>Anexo: Dimensionamento de componentes</b>   | <b>125</b> |
| A.1      | Juntas pré-esforçadas . . . . .  | 125        |
| A.2      | Seleção de rolamentos . . . . .  | 128        |
| <b>B</b> | <b>Anexo: Análise dos esforços</b>   | <b>131</b> |
| B.1      | Análise dos esforços da <i>Arquitetura Simples</i> no sentido horário . . . . .      | 131        |
| B.2      | Análise dos esforços da <i>Arquitetura Simples</i> no sentido anti-horário . . . . . | 132        |
| B.3      | Análise dos esforços da <i>Arquitetura Mista</i> no sentido horário . . . . .        | 133        |
| <b>C</b> | <b>Anexo: Toleranciamento dos rolamentos- <i>Koyo</i><sup>®</sup></b>                | <b>135</b> |
| <b>D</b> | <b>Anexo: Relatório do dimensionamento do redutor - <i>KISSsys</i><sup>®</sup></b>   | <b>143</b> |
| D.1      | Engrenamentos e análise estrutural . . . . .   | 143        |
| D.2      | Análise energética da conceção final . . . . .                                       | 273        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>E</b> | <b>Anexo:Desenhos do redutor - <i>Solidworks</i><sup>®</sup></b> | <b>279</b> |
| E.1      | Desenho de conjunto . . . . .                                    | 279        |
| E.2      | Desenhos de definição . . . . .                                  | 281        |
| E.3      | Desenho de conjunto em vista explodida . . . . .                 | 301        |



## Índice de figuras

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figura 1  | Tipos de dentado das engrenagens [6]. . . . .   | 6  |
| Figura 2  | Configuração de “ <i>power split</i> ” em sistema de transmissão de helicopetro [7].  | 7  |
| Figura 3  | Representação esquemática de uma engrenagem planetária [8]. . . . .   | 7  |
| Figura 4  | Representação da configuração convencional (“ <i>simple branch</i> ”) e da configuração a implementar (“ <i>double branch</i> ”) [6]. . . . .             | 9  |
| Figura 5  | Tabela com os valores do fator de aplicação, $K_A$ , para as diferentes condições de funcionamento na entrada e na saída [12]. . . . .                    | 10 |
| Figura 6  | Fatores de deslocamento do perfil em função do número de dentes e da soma destes, respetivamente (ISO/TR 4467) [14] . . . . .                             | 12 |
| Figura 7  | Diagrama de elaboração de soluções . . . . .  | 14 |
| Figura 8  | Arquitetura simples e arquitetura mista para o redutor a conceber [ <i>KISSsys</i> ®]. . . . .  | 15 |
| Figura 9  | Esquema da cadeia cinemática do redutor [ <i>KISSsys</i> ®]. . . . .  | 15 |
| Figura 10 | Esquema da configuração do redutor, com a indicação da nomenclatura dos respetivos componentes. . . . .   | 16 |
| Figura 11 | Representação dos esforços atuantes nos apoios, para cada uma das quatro situações possíveis. . . . .   | 28 |
| Figura 12 | Representação gráfica do tipo de lubrificação de cada andar em função da sua velocidade de rotação e do diâmetro primitivo de funcionamento [27]. . . . . | 35 |
| Figura 13 | Representação da modificação realizada nos dentes de cada roda dentada [20]. . . . .  | 37 |
| Figura 14 | Representação genérica da configuração de uma roda com reforços [6, 29, 30]. . . . .  | 40 |
| Figura 15 | Esquemas das variáveis para cálculo das perdas de potência por chapinagem [31]. . . . .   | 43 |
| Figura 16 | Representação gráfica da evolução do coeficiente de transferência de calor do cárter em diferentes situações e condições [32]. . . . .                    | 45 |
| Figura 17 | Representação do sistema de acoplamento por chaveta [adptada de [35, 36]].  | 52 |
| Figura 18 | Interface de dimensionamento de chavetas no software <i>KISSsoft</i> ®. . . . .   | 53 |
| Figura 19 | Representação do local de elaboração dos escateis e ilustração de arquitetura de montagem dos dois andares. . . . .                                       | 54 |
| Figura 20 | Representação da ponta de veio aplicada no veio D e realce do detalhe de elaboração. . . . .  | 55 |
| Figura 21 | Representação do estriado do veio e do cubo [39]. . . . .   | 56 |
| Figura 22 | Escolha e dimensionamento de estriado em evolvente [ <i>KISSsoft</i> ®]. . . . .  | 57 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 23 | Representação do veio A (veio de entrada) e indicação das secções críticas [KISSsys®]. . . . .   | 63 |
| Figura 24 | Representação do veio B e C (veios intermédios) e indicação das secções críticas [KISSsys®]. . . . .   | 64 |
| Figura 25 | Representação do veio D (veio saída) e indicação das secções críticas [KISSsys®]. . . . .  | 65 |
| Figura 26 | Processo de caraterização do estado de contaminação do lubrificante [43] .   | 66 |
| Figura 27 | Representação do redutor projetado [Solidworks®]. . . . .  | 71 |
| Figura 28 | Representação do sistema de alimentação extra dos rolamentos [Solidworks®].  | 74 |
| Figura 29 | Representação das castanhas de assento do conjunto parafuso-porca [Solidworks®]. . . . .   | 75 |
| Figura 30 | Representação das nervuras de reforço na metade superior [Solidworks®].  | 75 |
| Figura 31 | Representação dos reforços nas tampas de vigia na metade superior [Solidworks®].   | 75 |
| Figura 32 | Representação dos furos do conjunto de parafuso-porca na aba e das alhetas na zona dos canhões [Solidworks®]. . . . .                                | 76 |
| Figura 33 | Representação do perfil das patas de suporte e fixação ao exterior [Solidworks®]. . . . .  | 76 |
| Figura 34 | Campo de tensão equivalente de von Mises na metade superior [Solidworks®].   | 77 |
| Figura 35 | Campo de tensão de corte XY na metade superior [Solidworks®]. . . . .  | 77 |
| Figura 36 | Campo de deslocamento vertical Z na metade superior [Solidworks®]. . .   | 77 |
| Figura 37 | Campo de tensão equivalente de Von Mises na metade inferior [Solidworks®].   | 77 |
| Figura 38 | Campo de tensão de corte XY na metade inferior [Solidworks®]. . . . .  | 78 |
| Figura 39 | Campo de deslocamento vertical Z na metade inferior [Solidworks®]. . . .   | 78 |
| Figura 40 | Configuração da estrutura suporte dos rolamentos mais internos (Rol 2 e Rol 7) implementada [Solidworks®]. . . . .                                   | 78 |
| Figura 41 | Configuração inicial da estrutura suporte dos rolamentos mais internos (Rol 2 e Rol 7) alternativa [Solidworks®]. . . . .                            | 79 |
| Figura 42 | Representação da análise estrutural do postigo da arquitetura inicial [Solidworks®]. . . . .   | 80 |
| Figura 43 | Representação da análise estrutural do assento do postigo da arquitetura inicial [Solidworks®]. . . . .  | 81 |
| Figura 44 | Representação da análise estrutural da estrutura suporte dos rolamentos mais internos (Rol 2 e Rol 7) da solução implementada [Solidworks®]. . . . . | 82 |
| Figura 45 | Representação e cotação de uma tampa genérica. . . . .   | 84 |
| Figura 46 | Representação da análise estrutural da tampa de entrada [Solidworks®]. .   | 85 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| Figura 47 | Representação da análise estrutural da tampa intermédia entrada [ <i>Solidworks</i> ®]. . . . . | 86  |
| Figura 48 | Representação da análise estrutural da tampa intermédia saída [ <i>Solidworks</i> ®]. . . . .   | 86  |
| Figura 49 | Representação da situação de esforço cortante numa ligação [18]. . . . .                        | 87  |
| Figura 50 | Representação de uma junta pré-esforçada [18]. . . . .  | 88  |
| Figura 51 | Representação de um anel elástico para furo. . . . .  | 92  |
| Figura 52 | Representação esquemática da fixação dos rolamentos no veio de saída. . . . .                   | 92  |
| Figura 53 | Representação esquemática e 3D de um casquilho espaçador, com a respetivas cotas. . . . .       | 93  |
| Figura 54 | Representação do desafogo com forma A realizado nos veios e caixas [ISO 18388:2016]. . . . .    | 94  |
| Figura 55 | Representação do veio de entrada e do tipo de modificações realizadas. . . . .                  | 95  |
| Figura 56 | Bujão de adição [53]. . . . .   | 96  |
| Figura 57 | Representação esquemática com cotas do bujão de saída [53]. . . . .                             | 97  |
| Figura 58 | Indicador de nível [53]. . . . .  | 97  |
| Figura 59 | Esquema e dimensões do retentor e respetivo local de alojamento [54]. . . . .                   | 98  |
| Figura 60 | Cotagem e toleranciamento aplicados a uma roda dentada genérica [56]. . . . .                   | 101 |
| Figura 61 | Cotagem aplicada a um veio-pinhão genérico [56]. . . . .  | 102 |
| Figura 62 | Tolerâncias de paralelismo dos eixos dos veios dos engrenamentos [56]. . . . .                  | 103 |
| Figura 63 | Representação do sistema de acoplamento por chaveta [adptada de [35]]. . . . .                  | 103 |
| Figura 64 | Conexão com centragem no flanco dos dentes [39]. . . . .  | 104 |
| Figura 65 | Toleranciamentos de um estrido em evolvente [39]. . . . .                                       | 105 |
| Figura 66 | Representação genérica de um rolamento e suas dimensões principais [44]. . . . .                | 106 |
| Figura 67 | Toleranciamento geométrico dos locais de alojamento dos rolamentos [44]. . . . .                | 106 |
| Figura 68 | Representação do toleranciamento aplicado nas tampas de vedação. . . . .                        | 110 |
| Figura 69 | Toleranciamento de ranhuras de anéis elásticos [35]. . . . .                                    | 111 |
| Figura 70 | Toleranciamento da montagem dos anéis elásticos. . . . .  | 112 |
| Figura 71 | Toleranciamento de um casquilho. . . . .  | 113 |
| Figura 72 | Cotagem e toleranciamento aplicado no veio A (veio de entrada). . . . .                         | 114 |
| Figura 73 | Cotagem e toleranciamento aplicado na zona de entrada do veio intermédio (B/C). . . . .         | 115 |
| Figura 74 | Cotagem e toleranciamento aplicado a todo o veio intermédio B/C. . . . .                        | 116 |
| Figura 75 | Representação esquemática do cálculo da cota $d_{r2}$ . . . . .                                 | 117 |
| Figura 76 | Cotagem e toleranciamento aplicado em torno do veio de saída. . . . .                           | 118 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Figura 77 | Representação de uma junta pré-esforçada [18]. . . . .   | 125 |
| Figura 78 | Representação gráfica da evolução dos deslocamentos com o $F_i$ [18]. . . .  | 127 |
| Figura 79 | Representação do comportamento dos esforços em função de $F_e$ [18]. . . .   | 127 |
| Figura 80 | Representação dos esforços atuantes nos apoios na <i>Arquitetura Simples</i><br>com rotação no sentido horário. . . . .      | 131 |
| Figura 81 | Representação dos esforços atuantes nos apoios na <i>Arquitetura Simples</i><br>com rotação no sentido anti-horário. . . . . | 132 |
| Figura 82 | Representação dos esforços atuantes nos apoios da <i>Arquitetura Mista</i> com<br>rotação no sentido horário. . . . .        | 133 |

## Índice de tabelas

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tabela 1  | Propriedades mecânicas e designações do aço 18 CrNiMo 7 [23]. . . . .   | 17 |
| Tabela 2  | Rugosidades na superfície dos dentes nas configurações iniciais com dentado helicoidal simples [KISSsoft®]. . . . .   | 17 |
| Tabela 3  | Materiais utilizados nas configurações com dentado helicoidal simples. . .  | 18 |
| Tabela 4  | Propriedades mecânicas do aço 36 CrNiMo 4 [KISSsoft®]. . . . .  | 18 |
| Tabela 5  | Características dimensionais e de massa da <i>Configuração Simples 1</i> e <i>Configuração Simples 2</i> [KISSsoft®]. . . . .   | 20 |
| Tabela 6  | Características dimensionais e de massa da <i>Configuração Simples 3</i> e <i>Arquitetura Simples</i> [KISSsoft®]. . . . .  | 21 |
| Tabela 7  | Coefficientes de segurança , esforços e dados de funcionamento e energéticos da <i>Configuração Simples 1</i> e da <i>Configuração Simples 2</i> [KISSsoft®]. . . . . | 22 |
| Tabela 8  | Coefficientes de segurança , esforços e dados de funcionamento e energéticos da <i>Configuração Simples 3</i> e da <i>Arquitetura Simples</i> [KISSsoft®]. . . . .    | 23 |
| Tabela 9  | Características dimensionais e de massa da <i>Configuração Mista 1</i> e da <i>Configuração Mista 2</i> [KISSsoft®]. . . . .  | 25 |
| Tabela 10 | Coefficientes de segurança , esforços e dados de funcionamento e energéticos da <i>Configuração Mista 1</i> e <i>Configuração Mista 2</i> [KISSsoft®]. . . . .        | 26 |
| Tabela 11 | Esforços nos apoios dos veios B e C da <i>Arquitetura Simples</i> , para ambos os sentidos de rotação [KISSsoft®]. . . . .  | 29 |
| Tabela 12 | Dimensionamento dos veios: diâmetros, comprimentos, massa e coeficientes de segurança à fadiga e estático [KISSsoft®]. . . . .  | 30 |
| Tabela 13 | Dimensionamento dos veios: deformações elásticas à flexão e torção [KISSsoft®]. . . . .   | 31 |
| Tabela 14 | Caraterísticas técnicas dos rolamentos aplicados nos vários veios, para cada uma das arquiteturas [KISSsoft®]. . . . .  | 31 |
| Tabela 15 | Valores da massa de cada elemento e respetiva soma, para cada uma das Arquiteturas analisadas [KISSsoft®]. . . . .  | 32 |
| Tabela 16 | Valores de potência dissipada por cada elemento e respetiva soma, para cada uma das Arquiteturas analisadas [KISSsoft®]. . . . .                                      | 32 |
| Tabela 17 | Propriedades dos lubrificantes escolhidos [KISSsoft®]. . . . .  | 34 |
| Tabela 18 | Coefficientes de segurança e dados energéticos, para cada lubrificante na <i>Arquitetura Mista</i> [KISSsoft®]. . . . .   | 34 |
| Tabela 19 | Tipo de lubrificação nas roda dentada mergulhadas no lubrificante e respetivos dados para a sua obtenção [27]. . . . .  | 35 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Tabela 20 | Modificação no flanco e pé do dente e modificação na extensão do flanco<br>[ <i>KISSsoft</i> ®]. . . . .   | 37 |
| Tabela 21 | Coefficientes de segurança sem e com modificação do perfil do dente [ <i>KISSsoft</i> ®]. . . . .  | 38 |
| Tabela 22 | Espessuras das partes constituintes das rodas z2, z4 e z6 [6, 29, 30]. . . .   | 40 |
| Tabela 23 | Diâmetros das partes constituintes das rodas z2, z4 e z6, e repetiva massa<br>[6, 29, 30]. . . . .   | 40 |
| Tabela 24 | Valores das variáveis de cálculo da resistência no diâmetro do cubo das<br>rodas, $d_c$ . . . . .  | 41 |
| Tabela 25 | Perdas de potência em vários componentes do redutor, numa fase intermédia<br>de concepção. . . . .   | 44 |
| Tabela 26 | Resultados da capacidade de dissipação de energia do cárter, para as várias<br>condições apresentadas. . . . .                                       | 46 |
| Tabela 27 | Perdas de potência nos vários componentes e a perda total, para a configuração<br>final do redutor [ <i>KISSsys</i> ®]. . . . .                      | 47 |
| Tabela 28 | Dissipação de energia por parte do cárter e dos veios e respetivo valor<br>total, para a configuração final do redutor [ <i>KISSsoft</i> ®]. . . . . | 47 |
| Tabela 29 | Dimensão diametral, comprimento, massa e material para cada veio do<br>redutor [23] . . . . .  | 50 |
| Tabela 30 | Designação e propriedades mecânicas para o diâmetro do varão, para cada<br>um dos veios do redutor [23]. . . . .                                     | 50 |
| Tabela 31 | Designações e propriedades mecânicas do material das chavetas [ <i>KISSsoft</i> ®].  | 51 |
| Tabela 32 | Designação e dimensões das chavetas, e dimensões dos respetivos escateis<br>[ <i>KISSsoft</i> ®; [34]]. . . . .                                      | 52 |
| Tabela 33 | Coefficientes de segurança das chavetas e dos respetivos escateis [ <i>KISSsoft</i> ®].  | 52 |
| Tabela 34 | Dimensões características e coeficientes de segurança do estriado da roda<br>Z6 [39],[ <i>KISSsoft</i> ®]. . . . .                                   | 56 |
| Tabela 35 | Dimensões características e coeficientes de segurança do estriado de aco-<br>plamento ao exterior [39],[ <i>KISSsoft</i> ®]. . . . .                 | 56 |
| Tabela 36 | Valores da flecha combinada e da flecha admissível em cada um dos engre-<br>namentos [ <i>KISSsys</i> ®]. . . . .                                    | 59 |
| Tabela 37 | Valores da flecha máxima e da torção total em cada um dos veios, com os<br>repetivos valores admissíveis [ <i>KISSsys</i> ®]. . . . .                | 59 |
| Tabela 38 | Propriedades mecânicas para o diâmetro bruto e resistência à fadiga do<br>material, para cada veio. . . . .  | 61 |
| Tabela 39 | Coefficientes de segurança à fadiga nas secções críticas do veio A [ <i>KISSsys</i> ®].  | 63 |
| Tabela 40 | Coefficientes de segurança à fadiga nas secções críticas do veio B [ <i>KISSsys</i> ®].  | 63 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tabela 41 | Coeficientes de segurança à fadiga nas secções críticas do veio C [ <i>KISSsys</i> ®].                                | 64 |
| Tabela 42 | Coeficientes de segurança à fadiga nas secções críticas do veio D [ <i>KISSsys</i> ®].                                | 64 |
| Tabela 43 | Denominações e dimensões estruturais e de fixação dos rolamentos [44].  | 68 |
| Tabela 44 | Durabilidade, coeficiente de segurança e perda de potência de cada rolamento [ <i>KISSsys</i> ®].                     | 68 |
| Tabela 45 | Desalinhamentos reais e admissíveis, e deslocamentos e folgas axiais, nos rolamentos [ <i>KISSsys</i> ®].             | 68 |
| Tabela 46 | Dimensões da geometria do cárter.   | 71 |
| Tabela 47 | Denominações do material GGG50 [51].  | 74 |
| Tabela 48 | Propriedades mecânicas do material [51].  | 74 |
| Tabela 49 | Dimensões das tampas.   | 84 |
| Tabela 50 | Designações do material GGG35 [51].   | 84 |
| Tabela 51 | Propriedades mecânicas do material GGG35 [51].  | 84 |
| Tabela 52 | Esforços, deslocamentos e tensões equivalente de von Mises verificadas em cada uma das tampas [ <i>Solidworks</i> ®]. | 85 |
| Tabela 53 | Esforços, tensões e coeficientes de segurança nos parafusos das tampas de vedação [ <i>Solidworks</i> ®].             | 88 |
| Tabela 54 | Esforços, tensões e coeficientes de segurança no parafusos na união dos dois meios corpos [ <i>Solidworks</i> ®].     | 89 |
| Tabela 55 | Parafusos de fixação dos dois meios corpos do cárter [35].  | 89 |
| Tabela 56 | Esforços, tensões e coeficientes de segurança nos parafusos do postigo inicial [ <i>Solidworks</i> ®].                | 90 |
| Tabela 57 | Esforços, tensões e coeficientes de segurança nos parafusos do postigo implementado [ <i>Solidworks</i> ®].           | 90 |
| Tabela 58 | Lista de todos os parafusos necessários para o projeto e respetiva quantidade [36].                                   | 91 |
| Tabela 59 | Caraterização dos pinos [35].   | 91 |
| Tabela 60 | Identificação e caraterização dos anéis elásticos utilizados [52].  | 92 |
| Tabela 61 | Local, denominação e dimensões dos casquilhos espaçadores aplicados.  | 93 |
| Tabela 62 | Designações e propriedades mecânicas do aço St52 [23].  | 93 |
| Tabela 63 | Identificação da forma de desafoço [adaptada da norma ISO 18388:2016].  | 95 |
| Tabela 64 | Dimensões do desafoço a aplicar [adaptada da norma ISO 18388:2016].   | 95 |
| Tabela 65 | Dimensões das varias secções do bujão de adição [53].   | 96 |
| Tabela 66 | Dimensões das varias secções do bujão de saída [53].  | 97 |
| Tabela 67 | Dimensões das varias secções do indicador de nível [53].  | 97 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Tabela 68 | Dimensões das varias secções do tampão de orifícios [53]. . . . .                                    | 98  |
| Tabela 69 | Denominação e dimensões dos vedantes [54]. . . . .   | 98  |
| Tabela 70 | Expressões de calculo das tolerâncias geométricas [56]. . . . .                                      | 102 |
| Tabela 71 | Tolerâncias das dimensões das chavetas e respetivos escatéis [34]. . . . .                           | 103 |
| Tabela 72 | Tolerâncias dimensionais e geométricas de estriados em evolvente [39]. . .                           | 104 |
| Tabela 73 | Valores das variáveis $P$ e $C$ e da razão $\frac{P}{C}$ , para cada rolamento [ <i>KISSsoft</i> ®]. | 105 |
| Tabela 74 | Tolerâncias dimensionais e indicação da classe, para cada rolamento [44].                            | 106 |



## Palavras-chave

- Engrenagem;
- Redutor de engrenagens;
- Dentado helicoidal simples;
- Dentado helicoidal duplo;
- “*Power Split*”,
- Dimensionamento;
- Otimização;
- Rendimento;
- *KISSsys*<sup>®</sup>;
- *KISSsoft*<sup>®</sup>;
- *Solidworks*<sup>®</sup>;
- Toleranciamento.

## Siglas

PAO      **P**oli- **A**lfa- **O**lefinas

## Símbolos e nomenclatura

| Símbolo              | Unidade         | Designação   |
|----------------------|-----------------|--|
| $a_e$                | mm              | Comprimento do rebaixe                                 |
| $a_m$                | mm              | Comprimento de alojamento do anel                      |
| $a_1$                | -               | Confiabilidade   |
| $a_2$                | -               | Fator das propriedades do rolamento                    |
| $a_3$                | -               | Fator das condições de operação                        |
| $a'$                 | mm              | Entre-eixo de funcionamento                            |
| $A$                  | m <sup>2</sup>  | Área   |
| $A_{c\alpha}$        | m <sup>2</sup>  | Área exterior total da carcaça                         |
| $A_G$                | m <sup>2</sup>  | Área da secção lateral                                 |
| $A_l$                | mm <sup>2</sup> | Área da secção da ligação                              |
| $A_P$                | mm <sup>2</sup> | Área da secção do parafuso                             |
| $b$                  | mm              | Largura de um elemento                                 |
| $b_a$                | mm              | Rebordo do anel elástico                               |
| $b_0$                | mm              | Valor de referência da largura do dente, $b_0 = 10$ mm |
| $c$                  | mm              | Altura do cubo de uma engrenagem                       |
| $C$                  | MPa             | Carga dinâmica básica                                  |
| $C_e$                | mm              | comprimento exterior do cárter                         |
| $C_i$                | mm              | Comprimento interior do cárter                         |
| $C_{Sp}$             | -               | Fator de chapinagem                                    |
| $C_u$                | MPa             | Tensão limite de fadiga                                |
| $C_0$                | MPa             | Carga estática   |
| $C_{1,2}$            | -               | Fator na chapinagem                                    |
| $Ca_a$               | $\mu\text{m}$   | <i>Tip Relief</i>                                      |
| $Ca_{eff}$           | $\mu\text{m}$   | <i>Effective Relief</i>                                |
| $Ca_f$               | $\mu\text{m}$   | <i>Root Relief</i>                                     |
| $Cb$                 | $\mu\text{m}$   | Crowning   |
| $C.S.$               | -               | Coeficiente de segurança                               |
| $C.S.\text{chaveta}$ | -               | Coeficiente de segurança da chaveta                    |

| Símbolo       | Unidade | Designação  |
|---------------|---------|---|
| $C.S._{cubo}$ | -       | Coeficiente de segurança do escatel do cubo             |
| $C.S._{eixo}$ | -       | Coeficiente de segurança do escatel do eixo             |
| $d$           | mm      | Diâmetro de uma secção genérica                         |
| $d_a$         | mm      | Diâmetro de cabeça de uma roda dentada                  |
| $d_b$         | mm      | Diâmetro de base de uma roda dentada                    |
| $d_c$         | mm      | Diâmetro exterior do cubo da roda                       |
| $d_{cp}$      | mm      | Diâmetro da cabeça do parafuso                          |
| $d_{eff}$     | mm      | Diâmetro efetivo do veio                                |
| $d_f$         | mm      | Diâmetro de pé de uma roda dentada                      |
| $d_j$         | mm      | Diâmetro interior da jante da roda                      |
| $d_k$         | mm      | Diâmetro exterior da jante da roda                      |
| $d_m$         | mm      | Diâmetro médio do rolamento                             |
| $d_p$         | mm      | Diâmetro primitivo de uma roda dentada                  |
| $d_{pa}$      | mm      | Diâmetro dos parafusos                                  |
| $d_{ref}$     | mm      | Diâmetro de referência de um estriado                   |
| $d_{sh}$      | mm      | Diâmetro do veio  |
| $d_v$         | mm      | Diâmetro de um veio                                     |
| $d_{v_{max}}$ | mm      | Diâmetro máximo do veio                                 |
| $d_w$         | mm      | Diâmetro primitivo de funcionamento de uma roda dentada |
| $d_1$         | mm      | Diâmetro interno do retentor                            |
| $d_2$         | mm      | Diâmetro da ranhura para anel elástico                  |
| $d_3$         | mm      | Diâmetro de elementos normalizados                      |
| $D$           | mm      | Diâmetro do canhão das tampas                           |
| $D_{a1}$      | mm      | Diâmetro exterior do bujão de adição                    |
| $D_{a2}$      | mm      | Diâmetro exterior de assento do bujão de adição         |
| $D_{a3}$      | mm      | Diâmetro de centro dos parafusos do bujão de adição     |
| $D_{a4}$      | mm      | Diâmetro de aperto do bujão de adição                   |
| $D_f$         | mm      | Diâmetro do furo de saída para o veio                   |
| $D_{n1}$      | mm      | Diâmetro exterior do indicador de nível                 |
| $D_{n2}$      | mm      | Diâmetro visor do indicador de nível                    |

| Símbolo     | Unidade | Designação  |
|-------------|---------|---|
| $D_{n3}$    | mm      | Diâmetro de aperto do indicador de nível                      |
| $D_p$       | mm      | Diâmetro do centro de alojamento dos parafusos                |
| $D_r$       | mm      | Diâmetro de fixação do anel exterior do rolamento             |
| $D_{s1}$    | mm      | Diâmetro exterior do bujão de saída                           |
| $D_t$       | mm      | Diâmetro externo das tampas                                   |
| $D_v$       | mm      | Diâmetro de alojamento do vedante                             |
| $e_c$       | -       | Coefficiente do estado de contaminação                        |
| $e_{t1}$    | mm      | Espessura total da tampa                                      |
| $e_{t2}$    | mm      | Espessura da superfície de assento da tampa                   |
| $e_0$       | mm      | Valor de referência da altura de imersão, $e_0=10$ mm         |
| $e_{1,2}$   | mm      | Altura de imersão do pinhão e da roda no óleo, respetivamente |
| $E$         | GPa     | Módulo de elasticidade  |
| $f_l$       | -       | Fator do numero de horas de funcionamento                     |
| $f_n$       | -       | Fator da velocidade de rotação                                |
| $f_{0,1,2}$ | -       | Coefficientes de perdas nos rolamentos                        |
| $F$         | N ou kN | Força de corte  |
| $F_A$       | N       | Pré-esforço de aperto   |
| $F_e$       | N       | Esforço externo por parafuso                                  |
| $F_i$       | N       | Pré-esforço em juntas pré-esforçadas                          |
| $F_{max}$   | mm      | Folga máxima  |
| $F_{min}$   | mm      | Folga mínima  |
| $F_v$       | N       | Força vertical nos parafusos do postigo                       |
| $F_a$       | N ou kN | Força axial   |
| $F_{a_i}$   | N ou kN | Força axial interno no rolamento                              |
| $F_{a_w}$   | N ou kN | Força axial no primitivo de funcionamento                     |
| $F_n$       | N ou kN | Força normal  |
| $F_{n_w}$   | N ou kN | Força normal no primitivo de funcionamento                    |
| $F_r$       | N ou kN | Força radial  |
| $FR$        | N ou kN | Força radial resultante                                       |
| $F_t$       | N ou kN | Força tangencial  |

| Símbolo           | Unidade | Designação   |
|-------------------|---------|--|
| $F_x$             | N ou kN | Força na direção x   |
| $F_y$             | N ou kN | Força na direção y   |
| $F_z$             | N ou kN | Força na direção z   |
| $G$               | MPa     | Módulo de rigidez  |
| $h$               | mm      | Altura total do dente  |
| $h_c$             | mm      | Altura da chaveta  |
| $H$               | mm      | Altura da parede lateral de um cárter                          |
| $H_e$             | mm      | Altura externa do cárter                                       |
| $H_i$             | mm      | Altura interna do cárter                                       |
| $H_v$             | -       | Fator de perdas das engrenagens                                |
| $k$               | mm      | Altura da jante de uma engrenagem                              |
| $k_l$             | N/m     | Coeficiente de rigidez da ligação                              |
| $k_p$             | N/m     | Coeficiente de rigidez do parafuso                             |
| $K$               | -       | Fator de lubrificação  |
| $K_A$             | -       | Fator de aplicação   |
| $K_{F\alpha}$     | -       | Fator de distribuição transversal de carga no pé do dente      |
| $K_{F\beta}$      | -       | Fator de distribuição longitudinal de carga no pé do dente     |
| $K_{H\alpha}$     | -       | Fator de distribuição transversal de carga no flanco do dente  |
| $K_{H\beta}$      | -       | Fator de distribuição longitudinal de carga no flanco do dente |
| $K_v$             | -       | Fator dinâmico   |
| $K_{1_{def}}$     | -       | Fator de tamanho   |
| $l_{aba}$         | mm      | Largura da aba   |
| $l_{corte}$       | mm      | Comprimento útil mínimo da chaveta ao corte                    |
| $l_e$             | mm      | Largura externa do cárter                                      |
| $l_{esmagamento}$ | mm      | Comprimento útil mínimo da chaveta ao esmagamento              |
| $l_H$             | mm      | Comprimento equivalente  |
| $l_i$             | mm      | Largura interna do cárter                                      |
| $l_l$             | mm      | Comprimento da ligação   |
| $l_p$             | mm      | Comprimento do parafuso  |
| $L$               | mm      | Comprimento  |

| Símbolo   | Unidade        | Designação  |
|-----------|----------------|---|
| $L_{A1}$  | mm             | Comprimento da zona de filtragem                      |
| $L_{A2}$  | mm             | Comprimento do tampão de adição                       |
| $L_e$     | mm             | Largura externa do cárter                             |
| $L_i$     | mm             | Largura interna do cárter                             |
| $L_{mnh}$ | h              | Vida útil do rolamento                                |
| $L_{nh}$  | h              | Vida nominal de um rolamento                          |
| $L_{n1}$  | mm             | Comprimento da rosca do indicador de nível            |
| $L_{n2}$  | mm             | Comprimento de alojamento do visor indicador de nível |
| $L_{s1}$  | mm             | Comprimento da rosca do bujão de saída                |
| $L_{s2}$  | mm             | Comprimento do corpo de encosto bujão de saída        |
| $L_1$     | mm             | Comprimento do filtro do bujão de adição              |
| $I$       | m <sup>4</sup> | Momento de inercia de área                            |
| $I_p$     | m <sup>4</sup> | Momento de inercia polar                              |
| $m_n$     | mm             | Módulo nominal  |
| $M_f$     | N·m            | Momento fletor  |
| $M_{fP}$  | N·m            | Momento fletor no postigo                             |
| $M_t$     | N·m ou kN·m    | Momento torsor  |
| $n$       | rpm            | Velocidade de rotação                                 |
| $n_{aba}$ | -              | Número de abas de reforço numa engrenagem             |
| $n_p$     | -              | Número de parafusos                                   |
| $P$       | kN             | Carga dinâmica equivalente                            |
| $P_A$     | W              | Potência de entrada                                   |
| $P_T$     | W              | Potência total de perdas                              |
| $P_u$     | W              | Potência útil   |
| $P_{VD}$  | W ou kW        | Perda de potência nos vedantes                        |
| $P_{VL}$  | W ou kW        | Perda de potência nos rolamentos                      |
| $P_{VX}$  | W ou kW        | Perda de potência noutros elementos                   |
| $P_{VZ}$  | W ou kW        | Perda de potência nas engrenagens                     |
| $P_{VZP}$ | W ou kW        | Perda de potência nas engrenagens dependente da carga |
| $P_{VZ0}$ | W ou kW        | Perda de potência nas engrenagens por chapinagem      |

| Símbolo        | Unidade       | Designação                                       |
|----------------|---------------|--|
| $P_1$          | N             | Carga equivalente no rolamento                   |
| $Q_{ca}$       | W             | Fluxo de calor na superfície da carcaça          |
| $Q_t.$         | -             | Quantidade                                       |
| $r$            | mm            | Raio de aplicação de esforço                     |
| $r_{a2}$       | mm            | Raio de cabeça da roda                           |
| $r_e$          | mm            | Raio do rebaixe                                  |
| $r_r$          | rad           | Desalinhamento do rolamento                      |
| $r_{radm}$     | rad           | Desalinhamento do rolamento admissível           |
| $r_1$          | mm            | Raio de concordância do escatel da chaveta       |
| $Ra_F$         | $\mu\text{m}$ | Valor de rugosidade médio Ra, pé                 |
| $Ra_H$         | $\mu\text{m}$ | Valor de rugosidade médio Ra, flanco             |
| $Rz_F$         | $\mu\text{m}$ | Profundidade da rugosidade Rz determinada,pé     |
| $Rz_H$         | $\mu\text{m}$ | Profundidade da rugosidade Rz determinada,flanco |
| $s$            | mm            | Espessura do anel elástico                       |
| $S_a$          | mm            | Espessura da cabeça do dente                     |
| $S_B$          | -             | Fator de segurança para gripagem                 |
| $S_{Estatico}$ | -             | Fator de segurança estático                      |
| $S_F$          | -             | Fator de segurança para tensão no pé do dente    |
| $S_{Fadiga}$   | -             | Fator de segurança à fadiga                      |
| $S_H$          | -             | Fator de segurança para pressão nos flancos      |
| $S_{micro}$    | -             | Fator de segurança contra o micropitting         |
| $S_{Sint}$     | -             | Fator de segurança para raspagem                 |
| $S_0$          | -             | Coefficiente de segurança estático               |
| $t$            | mm            | Espessura  |
| $t_{aba}$      | mm            | Espessura da aba de reforço de uma engrenagem    |
| $t_c$          | mm            | Altura do escatel da chaveta no veio             |
| $t_e$          | mm            | Altura do rebaixe                                |
| $t_{etol}$     | mm            | Tolerância da altura do rebaixe                  |
| $t_1$          | mm            | Tolerância de cilindricidade                     |
| $t_2$          | mm            | Tolerância de batimento total                    |

| Símbolo      | Unidade       | Designação   |
|--------------|---------------|--|
| $t_3$        | mm            | Tolerância de perpendicular                            |
| $t_4$        | mm            | Tolerância de concentricidade / coaxibilidade          |
| $t_5$        | mm            | Tolerância de circularidade                            |
| $t_6$        | mm            | Tolerância de planeza                                  |
| $t_7$        | mm            | Tolerância de paralelismo                              |
| $t_8$        | mm            | Tolerância de batimento circular (axial)               |
| $t_9$        | mm            | Tolerância de localização                              |
| $t_{10}$     | mm            | Tolerância de batimento circular (radial)              |
| $T$          | mm            | Altura do escatel no cubo                              |
| $T_{aj.}$    | mm            | Tolerância de ajustamento                              |
| $T_{Hi}$     | N·m           | Binário hidráulico                                     |
| $T_n$        | N·m           | Binário nominal  |
| $T_{VL}$     | N·m           | Binário de perdas totais nos rolamentos                |
| $T_{VL0}$    | N·m           | Binário de perdas independente da carga nos rolamentos |
| $T_{VLP1,2}$ | N·m           | Binário de perdas dependente da carga nos rolamentos   |
| $u$          | -             | Razão de transmissão                                   |
| $u_A$        | $\mu\text{m}$ | Folga axial do rolamento                               |
| $u_y$        | $\mu\text{m}$ | Deslocamento axial do rolamento                        |
| $U_M$        | mm            | Perímetro de uma face do redutor                       |
| $v$          | m/s           | Velocidade tangencial no primitivo                     |
| $v_{dw}$     | m/s           | Velocidade tangencial no primitivo de funcionamento    |
| $v_{ga}$     | m/s           | Velocidade de deslizamento máxima na cabeça            |
| $v_t$        | m/s           | Velocidade tangencial no primitivo de funcionamento    |
| $v_{t0}$     | m/s           | Velocidade tangencial de referência                    |
| $V_i$        | -             | Deslocamento vertical na direção i                     |
| $x$          | -             | Fator de correção do perfil                            |
| $XL$         | -             | Fator do lubrificante                                  |
| $Y$          | -             | Fator de cálculo (tipo de rolamento)                   |
| $z$          | -             | Número de dentes de uma engrenagem                     |
| $\alpha_n$   | °             | Ângulo de pressão nominal                              |



| Símbolo             | Unidade            | Designação                                       |
|---------------------|--------------------|--|
| $\alpha_{ca}$       | W/m <sup>2</sup> K | Coefficiente de transferência de calor combinado |
| $\beta_b$           | °                  | Ângulo de hélice no círculo de base              |
| $\beta_n$           | °                  | Ângulo de hélice nominal                         |
| $\delta_{adm}$      | μm                 | Flecha admissível num veio                       |
| $\delta_g$          | μm                 | Flecha num engrenamento                          |
| $\delta_{gadm}$     | μm                 | Flecha admissível num engrenamento               |
| $\delta_{max}$      | μm                 | Flecha máxima num veio                           |
| $\delta_y$          | μm                 | Deslocamento axial das tampas                    |
| $\epsilon$          | -                  | Razão de condução                                |
| $\epsilon_\alpha$   | -                  | Razão de condução aparente                       |
| $\epsilon_\beta$    | -                  | Razão de condução de hélice                      |
| $\epsilon_{1,2}$    | -                  | Razão de contacto no addendum do pinhão/roda     |
| $\eta_{Total}$      | %                  | Rendimento total do redutor                      |
| $\lambda_{min}$     | -                  | Espessura específica de filme lubrificante       |
| $\mu$               | -                  | Coefficiente de atrito                           |
| $\mu_{mz}$          | -                  | Coefficiente de fricção no contacto entre dentes |
| $\nu_{40}$          | mm <sup>2</sup> /s | Viscosidade cinemática a 40 °C                   |
| $\nu_{100}$         | mm <sup>2</sup> /s | Viscosidade cinemática a 100 °C                  |
| $\phi_{rol}$        | mm                 | Diâmetro do rolamento                            |
| $\phi_{varão}$      | mm                 | Diâmetro de fornecimento do varão                |
| $\rho_{15^\circ C}$ | kg/m <sup>3</sup>  | Massa volumétrica de um lubrificante a 15 °C     |
| $\sigma_{adm}$      | MPa                | Tensão admissível                                |
| $\sigma_{bw}$       | MPa                | Resistência à fadiga à flexão                    |
| $\sigma_B$          | MPa                | Resistência à rutura                             |
| $\sigma_{comp.}$    | MPa                | Resistência à rotura (compressão)                |
| $\sigma_{eq}$       | MPa                | Tensão equivalente de von Mises                  |
| $\sigma_m$          | MPa                | Tensão media                                     |
| $\sigma_{max}$      | MPa                | Tensão máxima                                    |
| $\sigma_{min}$      | MPa                | Tensão mínima                                    |
| $\sigma_S$          | MPa                | Limite de elasticidade                           |

| Símbolo           | Unidade | Designação   |
|-------------------|---------|--|
| $\sigma_{tração}$ | MPa     | Resistência à rotura (tração)                          |
| $\sigma_{zdw}$    | MPa     | Resistência à fadiga ao esforço normal                 |
| $\sum_x$          | -       | Soma dos fatores de correção de perfil                 |
| $\tau_{adm}$      | MPa     | Tensão de corte admissível                             |
| $\tau_{eq}$       | MPa     | Tensão de corte equivalente                            |
| $\tau_{tw}$       | MPa     | Resistência à fadiga à torção                          |
| $\theta_{adm}$    | °       | Torção admissível num veio                             |
| $\theta_{max}$    | °C      | Temperatura máxima de funcionamento de um lubrificante |
| $\theta_{min}$    | °C      | Temperatura mínima de funcionamento de um lubrificante |
| $\Theta_{adm}$    | °       | Torção admissível num veio                             |
| $\Theta_{total}$  | °       | Torção total num veio                                  |
| $v_{air}$         | °C      | Temperatura do ar ambiente                             |
| $v_{oil}$         | °C      | Temperatura do óleo                                    |

## 1 Introdução

Nos últimos anos, a procura de uma maior produtividade tem aumentado. Pretende-se garantir a competitividade, principalmente, entre empresas, uma vez que se assiste à automatização dos processos em muitas delas.

Uma solução para esta necessidade passa pela obtenção de equipamentos com maior potência e menores dimensões, em comparação aos existentes, principalmente para certas aplicações industriais que envolvem esforços significativos.

Pode, assim, falar-se de redutores de elevada potência aplicados nesses equipamentos, que garantem o acoplamento entre o sistema motor e o sistema de produção, garantindo os requisitos na entrada deste último.

Com a crescente aposta nos motores elétricos como sistemas de acionamento, os redutores assumiram maior importância e viram a sua procura aumentada, visto que este tipo de acionamento apresenta elevada velocidade de rotação e baixo binário, contrariamente aos motores de combustão.

Atualmente, prefere conjugar-se um motor elétrico com um redutor de velocidade, obtendo-se uma solução com as características pretendidas à saída deste último, mais económica e com menor impacto ambiental.

Para se obter equipamentos pequenos com elevada capacidade de carga, são realizados estudos sobre novas formas construtivas, as quais surgem, geralmente, de modificações realizadas nas existentes.

A configuração do dentado e a forma como esta é aplicada, levam ao surgimento de novos tipos de redutores de engrenagens, sempre no sentido da maior capacidade de carga e menor atravancamento. Atualmente, destacam-se os redutores de engrenagens helicoidais e de engrenagens planetárias. Estes últimos são muito utilizados em aplicações de elevada potência e exigência, como os aerogeradores e os mecanismos de transmissão de helicópteros.

De modo a aperfeiçoar as características dos redutores com dentado helicoidal para situações de elevada potência, surgiu o conceito de “*power split*”.

Este conceito, tal como a sua denominação indica, consiste na divisão da potência em mais do que um engrenamento, tal como acontece nos redutores epicicloidais. No entanto, a sua forma construtiva é diferente.

Os redutores de engrenagens com “*power split*” foram concebidos de modo a apetrechar o mercado com configurações mais simples, essencialmente para aplicações de elevada responsabilidade e com elevada capacidade de carga, tendo em conta a otimização do rendimento, comparativamente ao redutores planetários. Um pequeno aumento do rendimento nestes sistemas representa uma diminuição considerável das perdas, que leva a que o equipamento não necessite de possuir uma configuração complexa para a evacuação dessa energia.

Este conceito apresenta uma configuração semelhante à de um redutor de andares simples, só que com maior capacidade de carga para as mesmas engrenagens ou menores dimensões das engrenagens para a mesma carga. Isto resulta de uma diminuição das cargas nos engrenamentos por andar, visto que a potência é dividida.

Esta forma construtiva está em desenvolvimento, para se encontrar a melhor arquitetura e os parâmetros que influenciam o seu correto funcionamento, nomeadamente, a divisão perfeita de potência pelos dois engrenamentos do andar de entrada.

Para se obter uma divisão equitativa da potência, as tolerâncias devem ser apertadas e a precisão de fabrico elevada. A rigidez dos caminhos de potência apresenta, também, um forte contributo.

O fabrico em série destes redutores, conduz ao toleranciamento apertado (resultante da necessidade de precisão) e ao toleranciamento bem estruturado para evitar a necessidade de ter de retificar os componentes, a quando da montagem.

## 1.1 Enquadramento do projeto e motivação

A tendência crescente de utilização de equipamentos com maior capacidade de carga, para atingir maior produtividade, requer uma resposta eficaz do mercado a esta procura. Isso passa pela implementação de soluções que remetam para uma maior eficiência e um menor atravancamento dos equipamentos, tornando-os competitivos e com menor custo.

Por estes motivos, o dimensionamento de um redutor de velocidade (de elevada potência) para a indústria, aplicando o conceito de “*power split*”, torna-se um desafio grande na obtenção de uma solução mais robusta e competitiva do que as construções com engrenamentos simples.

O dimensionamento deste tipo de redutores implica o estudo pormenorizado dos engrenamentos, de forma a conseguir-se uma divisão equitativa da potência. Tal procedimento implica a aplicação dos conhecimentos teóricos apreendidos ao longo do percurso académico, uma pesquisa centrada no tema e no conhecimento prático de certos sistemas.

O tema da dissertação, além de ser apelativo e desafiante, é um ponto de partida para o mundo empresarial neste ramo. Permite, igualmente, ao estudante adquirir e desenvolver um espírito crítico e aprender a cadeia de etapas de um projeto, obrigando à tomada de decisões importantes, de forma ponderada. Proporciona, também, a sensibilidade para avaliar a exequibilidade dos fundamentos teóricos e perceber as capacidades e limitações práticas, que existem nos processos de conceção e montagem destes sistemas.

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é projetar um redutor industrial de alta potência, com 375 kW de potência nominal, utilizando o conceito de “*power split*”, em que o estudo da lubrificação e eficiência das engrenagens e rolamentos assume grande importância para maximizar a fiabilidade e eficiência do redutor.

Os restantes objetivos são:

- o redutor deve apresentar, a nível funcional, dois sentidos de rotação com a mesma capacidade de carga e, a nível estrutural, um reduzido atravancamento;
- a arquitetura das engrenagens e o dimensionamento de muitos componentes do redutor (engrenagens, rolamentos e mecanismos de transmissão de potência) devem ser desenvolvidos

utilizando os programas *KISSsys*<sup>®</sup> e *KISSsoft*<sup>®</sup>;

- diferentes configurações para os engrenamentos devem ser apresentadas e comparadas, de modo a que a configuração final resulte da otimização da concepção;
- no relatório da dissertação devem ser anexados os relatórios do dimensionamento efetuado;
- o desenho de conjunto e de montagem, bem como todos os desenhos de definição devidamente cotados devem ser apresentados.

### 1.3 Metodologia do projeto

O projeto do redutor de velocidade foi dividido em duas partes: a do dimensionamento e a dos desenhos.

No dimensionamento do redutor, optou-se, inicialmente, pela obtenção de soluções diversificadas para a arquitetura das engrenagens, cujos parâmetros de comparação estariam, cada vez mais, focados em características particulares, no sentido de se conseguir uma arquitetura otimizada.

As tarefas a executar, nesta parte, foram estruturadas da seguinte forma:

- pesquisa e identificação de dados importantes sobre este tipo de construção;
- aprendizagem e desenvolvimento de capacidade de manuseamento dos softwares utilizados;
- realização e comparação de configurações com dentado helicoidal simples;
- realização e comparação de configurações com dentado helicoidal simples e duplo (configurações mistas);
- escolha e otimização da melhor configuração;
- pré-dimensionamento dos restantes elementos do redutor;
- análise energética do redutor pré-dimensionado;
- desenvolvimento do dimensionamento do redutor e apresentação da arquitetura final;
- análise energética (rendimento) e de lubrificação da arquitetura final.

Transversalmente, em todas as etapas apresentadas, os critérios de seleção das configurações e de implementação de modificações foram: a obtenção de coeficientes de segurança adequados e perdas de potência reduzidas, nos vários componentes.

Na parte dos desenhos, uma vez que existe dependência entre desenhos (desenhos de conjunto e desenhos de definição), não existe uma ordem cronológica bem definida das etapas. Os desenhos foram realizados simultaneamente, de modo a obter-se uma cotação funcional mais adequada.

## 1.4 Estrutura da dissertação

Este documento está estruturado em vários capítulos. As referências e os Anexos podem ser encontrados no final documento.

### Capítulo 2

O capítulo 2 inicia-se com a contextualização de um redutor genérico, explicando as várias formas construtivas de redutores e os parâmetros importantes a ter em conta no seu dimensionamento. Posteriormente, apresenta-se algum trabalho já realizado nesta área, indicando alguns exemplos de redutores deste género, aplicados nos vários setores industriais. Finaliza-se com uma breve explicação do tipo de redutor adotado e da aplicação para a qual foi desenvolvido.

### Capítulo 3

No capítulo 3, começa-se por fazer uma breve abordagem ao software utilizado, seguindo-se uma exposição dos parâmetros importantes a ter em conta no dimensionamento de engrenagens (obtidos em função da necessidade e da adequação à aplicação que se pretende). Explica-se, em seguida, o conteúdo inerente às configurações analisadas e comparadas entre si, do qual surge arquitetura final das engrenagens a otimizar. São, assim, indicados os resultados dos parâmetros de comparação e as propriedades dos materiais das rodas dentadas e outros componentes pré-dimensionados neste capítulo.

### Capítulo 4

No capítulo 4, apresentam-se os parâmetros tidos em conta na otimização das engrenagens da solução escolhida no capítulo 3. Termina-se com a exposição da análise energética do redutor pré-dimensionado e da conceção final, abordando o método de dissipação da energia associada às perdas de potência.

### Capítulo 5

No capítulo 5, começa-se por descrever as características de cada componente do redutor, juntamente com o processo de cálculo e/ou considerações tomadas na sua escolha.

### Capítulo 6

No capítulo 6, dá-se uma breve explicação sobre os desenhos realizados e faz-se uma apresentação das cotas e tolerâncias aplicadas nestes, juntamente com a respetiva justificação.

### Capítulo 7

O último capítulo contém as conclusões da dissertação e apresenta alguns trabalhos futuros para completar o projeto noutras vertentes.

## 2 Redutor de Velocidade

### 2.1 Contextualização

Os equipamentos constituintes dos sistemas de produção utilizados, nas diversas indústrias, são, geralmente, acionados por diferentes tipos de sistemas motrizes (motores elétricos, motores de combustão e acionamentos por turbinas, por exemplo). Essas fontes de movimento rotativo fornecem, frequentemente, características de velocidade de rotação, muito acima das necessárias à sua utilização, nos diferentes processos industriais. Surge, assim, a necessidade de aplicação de redutores de velocidade.

Na indústria, os redutores são aplicáveis em diversos setores: o petroquímico, o químico, o automóvel, o farmacêutico, o mineiro, a produção alimentar e de bebidas, etc.

Os redutores de engrenagens permitem ajustar as características da fonte de rotação, de acordo com a necessidade do sistema acionado, aumentando o momento torsor e diminuindo a velocidade de rotação, com o mínimo de perdas de potência. A transmissão por engrenagens apresenta um elevado rendimento, comparativamente a outros sistemas de transmissão mecânica.

Os redutores podem apresentar vários andares de redução, em que o número depende da gama de potências e velocidades, da razão de transmissão admissível por andar ou do conjunto e das especificidades da aplicação (por exemplo a limitação de espaço) [1].

A nível de construção, classificam-se pelo tipo de engrenagens e posição relativa dos eixos e arranjo das engrenagens: redutor com eixos paralelos; redutor com eixos ortogonais; redutor de engrenagem com eixos perpendiculares não coplanares e redutor de engrenagem com eixos coaxiais.

Centrando a análise nos redutores de eixos paralelos, estes permitem a utilização de engrenagens de dentado reto, helicoidal simples e duplo ou em espinha de peixe.

Geralmente, para um sistema de eixos paralelos, a redução por andar, teoricamente, pode ser de 8:1-10:1, podendo ir em caso especiais até 18:1. Para dois andares de redução esta pode atingir valores de 45:1, ou em situações específicas até 60:1 e para três ou mais andares, reduções até 200:1 e, em casos especiais, até 300:1. Obtêm-se assim, engrenamentos para potências até 15-22,4 MW, bem como velocidades até 150-200 m/s, no primitivo de funcionamento.

Por andar de redução, consoante a forma construtiva, precisão de fabrico e as suas dimensões, verificam-se, normalmente, rendimentos entre 95-99 %. Estes redutores apresentam também elevada vida de funcionamento e processos de fabrico mais fáceis e baratos [2, 3].

O dentado das engrenagens de um redutor é escolhido em função da sua potência, velocidade e dimensões finais. Assim, o dentado reto é aplicado para reduções menores e binários e velocidades baixas. As dimensões destes redutores são geralmente grandes, comparativamente às dos redutores de engrenagens helicoidais com a mesma razão de transmissão, uma vez que as suas rodas dentadas apresentam maiores dimensões.

As engrenagens de dentado reto caracterizam-se por apresentarem razões de transmissão por andar até 6: 1 e rendimentos de 94-98 %. Estas engrenagens, além de serem simples e baratas de fabricar, são altamente fiáveis [3, 4].

O dentado helicoidal permite a transmissão de potências elevadas, maiores velocidades de rotação, razões de transmissão elevadas e apresentam maior rendimento [1]. Apresenta, também uma maior razão de condução,  $\varepsilon$ , e um engrenamento mais silencioso e com choques menos intensos (maior suavidade do engrenamento), comparativamente ao dentado reto, visto que a configuração do dentado conduz a um maior número de pares de dentes engrenados.

O dentado helicoidal simples conduz ao surgimento de forças axiais, no entanto, é muito aplicado em equipamentos de elevada potência. Estas engrenagens apresentam uma vida significativa, atendendo à sua elevada capacidade de transmissão de carga e maior área de contato, comparativamente ao dentado reto. Isto provoca um menor desgaste, pois a carga será distribuída por um maior número de dentes [5, 6].

O dentado helicoidal duplo ou em espinha, devido à sua dupla hélice simetricamente combinada, apresenta vantagens em relação ao dentado helicoidal simples: a ausência de esforços axiais; a obtenção de menores diâmetros dos veios e rolamentos; menores perdas nos rolamentos (visto que podem ser utilizados rolamentos de esferas); geralmente, menores módulos e número de dentes para a mesma capacidade de carga, que conduz a um menor comprimento de engrenamento, perdas e desgaste [3].

O ponto fraco deste dentado é a sua maior largura, principalmente quando se pretende obter a mesma razão de condução de hélice,  $\varepsilon_\beta$ , do dentado helicoidal simples. A largura desta engrenagem por si só já é maior, visto que na maioria dos casos surge a necessidade de elaborar uma ranhura central, para permitir a saída da ferramenta de corte na talhagem dos dentes. No entanto, existem métodos de fabrico que não necessitam de tal ranhura para realizar a talhagem do dentado.

A Figura 1 apresenta os dois grandes tipos de dentado analisados.

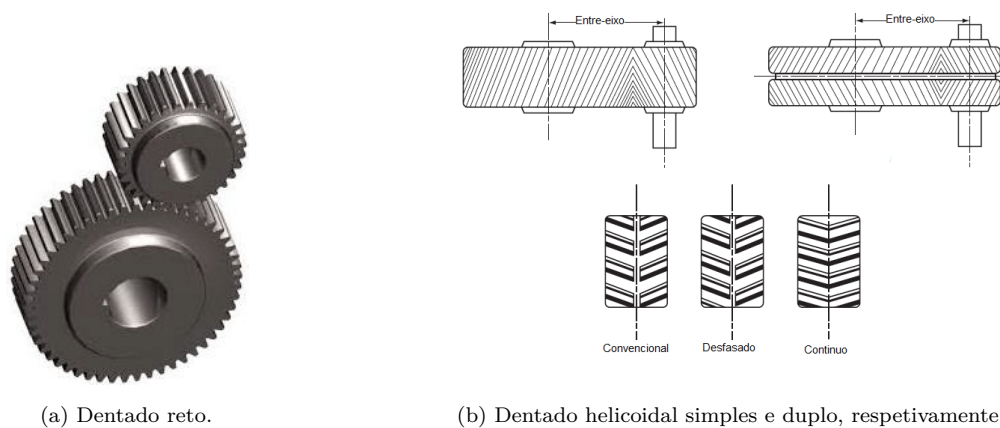


Figura 1: Tipos de dentado das engrenagens [6].

Os redutores de eixos paralelos para a indústria, aplicados por exemplo nos transportadores, nos guindastes, na indústria de movimentação de terras, na energia, etc, usam, geralmente, engrenagens helicoidais. A título de exemplo, um transportador de terras necessita de um redutor com uma potência de 132 kW, velocidade de entrada de 1400 rpm e de saída de 140 rpm, utilizando uma redução de 10:1 [3, 4, 5].

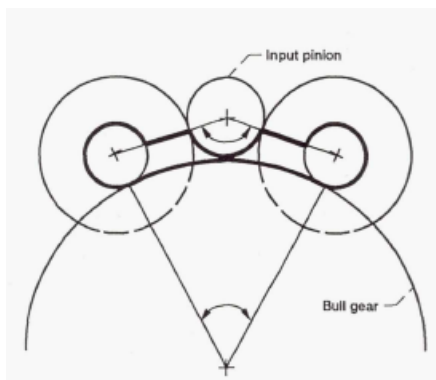
Em muitas aplicações de elevada potência, nem recorrendo ao dentado helicoidal se conseguem obter dimensões reduzidas e durabilidade elevada do redutor. Neste sentido, surge o conceito



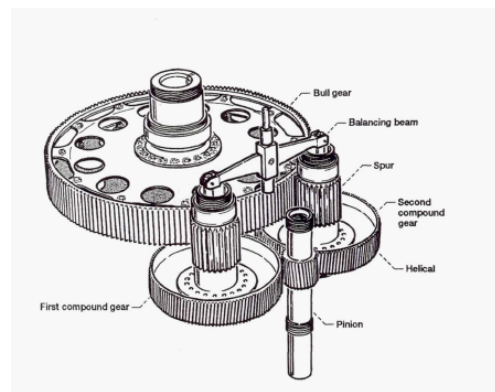
de “*power split*”, que permite dividir a potência de entrada, por diferentes engrenamentos (no primeiro andar), mais concretamente em dois.

A implementação do conceito de “*power split*” leva a que o pinhão do primeiro andar (elemento mandante) acione duas rodas dentadas, estabelecendo dois engrenamentos paralelos, tal como evidenciado na Figura 2. Esta divisão de potência segundo dois caminhos leva à diminuição das forças e tensões em cada roda dentada do sistema. No último andar do redutor, é realizado o processo oposto, transmitindo novamente toda a potência através da roda de saída e respetivo veio.

Esta solução construtiva admite a aplicação do dentado reto e do dentado helicoidal simples ou duplo mas, dada a particularidade da configuração dos engrenamentos e as aplicações a que se destina, torna-se mais adequada à utilização de dentado helicoidal.



(a) Posicionamento das engrenagens numa transmissão de helicóptero de forma a eliminar a folga.



(b) Mecanismo de auto-ajuste.

Figura 2: Configuração de “*power split*” em sistema de transmissão de helicóptero [7].

Atendendo à diversidade de formas construtivas possíveis de serem aplicadas em situações de elevada potência, neste trabalho desenvolveu-se uma configuração baseada no conceito “*power split*”, pretendendo-se, nesta fase inicial, realizar uma comparação entre essas várias formas.

Os aerogeradores e o sistema de transmissão das pás de helicópteros são exemplos de aplicações de elevada potência, por vezes superior aos 375 kW, que estão a desenvolver estudos de implementação deste conceito de “*power split*”. Estas aplicações apresentam como modo construtivo convencional os estágios planetários, Figura 3. Estes apresentam-se, atualmente, como a solução construtiva mais utilizada e desenvolvida para situações de elevada potência.

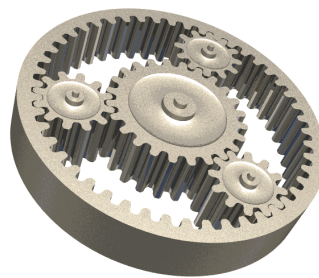


Figura 3: Representação esquemática de uma engrenagem planetária [8].

Os estudos de implementação do conceito de “*power split*” são realizados, uma vez que ambas as formas construtivas (planetária e “*power split*”) têm o mesmo princípio de transmissão

de potência (divisão de potência por mais do que um engrenamento simples, em simultâneo), permitindo sobretudo diminuir a complexidade construtiva. O desenvolvimento deste conceito nos mecanismos referidos contribui para a aplicação deste em mecanismos de menores exigências, como o deste projeto [7, 9].

Comparativamente a um estágio planetário, o ultimo andar de redução da concepção com binário dividido pode apresentar uma razão de transmissão maior. Uma maior redução na fase final diminui o peso do redutor, pelo que o recurso a este tipo de redutores torna-se uma opção atrativa, especialmente quando se pretende peso mínimo, como é o caso dos helicópteros [7].

Nos aerogeradores, o binário motor é induzido através das pás do rotor e do veio principal, o qual é muito elevado. Nesta aplicação, o método inicial (um planetário e vários andares helicoidais) foi substituído por três estágios planetários (método convencional). Estes permitem uma compactação máxima (menores larguras e diâmetros das rodas e veios), uma construção muito mais leve, um aumento do tempo de rotação da turbina (para um valor que permita uma elevada eficiência do gerador), melhores coeficientes de segurança (SH (pitting) e SF (flexão)) das engrenagens, temperaturas flash bem equilibradas e melhor lubrificação, o que permite passar de 2 MW para 5 MW. Estas vantagens também acontecem quando se implementa um sistema com divisão de potência, pelo que constitui uma boa alternativa à configuração com engrenamentos simples por andar. Tal acontece devido à diminuição da carga nos engrenamentos, que conduz a atravancamento mais reduzido das engrenagens, dos rolamentos e dos veios, bem como a uma diminuição de perdas.

No entanto, surge a necessidade de encontrar ainda melhores condições de funcionamento e estruturais destes sistemas, face aos redutores planetários, para ganharem maior relevância no mercado [9].

T. L. Krantz *et al.* [7] defende que transmissões com divisão de binário bem concebidas oferecem as seguintes vantagens sobre as configurações planetárias: elevada razão de transmissão na fase final; número reduzido de andares de redução; menores perdas de energia; maior fiabilidade dos “caminhos” de energia; menor número de rodas dentadas e rolamentos; menor ruído, podendo-se assim afirmar que um projeto com uma solução construtiva de “*power split*” permite uma elevada razão entre potência e massa na transmissão [10].

A maior dificuldade na sua implementação nos sistemas é a definição correta da sua configuração de modo a garantir que a energia seja distribuída por igual nos engrenamentos paralelos do primeiro andar. O problema da divisão de potência resulta dos desvios de geometria da caixa de engrenagens e das propriedades ideais para as engrenagens e para os veios, como por exemplo a rigidez e as dimensões. Na prática, a geometria não será ideal e, três dos engrenamentos estão em contacto, enquanto o quarto engrenamento apresenta uma folga. Quanto maior for o momento aplicado ao sistema, a deformação sofrida nos veios leva à eliminação da folga verificada no quarto engrenamento, mas a divisão de potência passa a ser não equitativa.

Os métodos de divisão de carga devem seguir um dos seguintes modos: minimizar os desvios de geometria para conseguir eliminar a folga sem carga ou minimizar o momento necessário para eliminar folga no engrenamento.

Foram estabelecidos vários processos para se conseguir obter uma divisão equitativa de energia, mas ainda precisam de comprovação funcional. Destacam-se, essencialmente, dois pro-

cessos: processo com fundamento no balanceamento de cargas axiais e o processo baseado na conformidade de torção dos caminhos de carga para alcançar uma boa divisão da mesma.

Um outro processo, para a divisão de potência na presença de engrenagens helicoidais, foi proposto. Neste, a folga dentro do sistema de engrenagens, em circuito fechado, pode ser eliminada ajustando as posições axiais das engrenagens helicoidais. Estas podem ser ajustadas, por calços personalizados em cada redutor na montagem, ou por um mecanismo de auto-ajuste que movimenta as engrenagens helicoidais, axialmente, em resposta a cargas axiais. A Figura 2 representa uma das configurações de auto-ajuste [7].

O importante, neste assunto, é identificar os principais parâmetros de concepção que influenciam o comportamento dinâmico do sistema em estudo. De entre esses parâmetros, a rigidez e as dimensões das engrenagens e veios assumem um peso acrescido, principalmente em aplicações como as abordadas.

### 2.2 Redutor de 350 kW

O redutor, que se pretende conceber, apresenta uma potência nominal de 375 kW e uma velocidade de entrada de 1000 rpm. A concepção deste redutor apresenta os seguintes requisitos construtivos:

- implementação do conceito de “*power split*”;

O conceito de “*power split*” representa a divisão de potência por mais do que um engrenamento no andar de entrada. Este conceito é aplicado numa configuração em “*double-branch*” (Figura 4b), que consiste em engrenamentos duplos por andar, conduzindo à transmissão de potência dividida por dois caminhos de energia, a qual se aglutina no ultimo andar (processo oposto ao da divisão no primeiro andar).

Existem andares deste tipo projetados para uma transmissão de potências na ordem dos 45 MW, que dificilmente será conseguida numa configuração de “*simple branch*”, isto é, engrenamentos simples por andar, sujeitos à potência total a transmitir [2, 6].

O “*double branch*” torna-se vantajoso, uma vez que a carga em cada engrenamento é menor, conduzindo a módulos e larguras menores (configuração mais compacta) e a uma maior durabilidade, comparativamente à configuração “*simple branch*”, Figura 4a.



(a) Transmissão de potência através de engrenamentos simples.

(b) Transmissão de potência através de engrenamentos duplos.

Figura 4: Representação da configuração convencional (“*simple branch*”) e da configuração a implementar (“*double branch*”) [6].

- velocidade de saída de 60 rpm, que conduz a uma razão de transmissão total de 16,666(7), obtida por intermédio de dois andares de redução;
- maior razão de transmissão no primeiro andar, assumindo-se como valores de referência  $i_1 = 4,5$  e  $i_2 = 3,67$ , respetivamente para cada um dos andares;

Segundo indicações de técnicos alemães [11], para reduções totais elevadas, as reduções por andar devem ser decrescentes ao longo dos mesmos. Com a aplicação desta indicação, ocorre um maior decréscimo da velocidade e um aumento dos momentos torsores nos primeiros andares, que leva a um sobredimensionamento dos veios e rodas dentadas. Tal situação leva a um aumento da massa dos componentes, que conduz a uma redução das velocidades críticas do redutor (caraterísticas internas dos redutores), afastando-as da velocidade de funcionamento e evitando assim, o aparecimento de níveis de vibração e ruído indesejáveis (pela possibilidade de ocorrências de fenómenos de ressonância) [2].

- redutor bipartido com veios paralelos entre si e respetivos eixos contidos no mesmo plano. Esta disposição conduz a veios de entrada e de saída coaxiais e a um entre-eixo igual em ambos os andares;
- dois sentidos de rotação com a mesma capacidade de carga;
- uma vida útil de 20 000 h de funcionamento;
- dimensionamento para condições desfavoráveis, isto é, para um fator de aplicação,  $K_A$ , de 1,6 (Figura 5);

As aplicações de referência consideradas para este redutor são a exploração mineira ou a indústria cimenteira, nas quais se verifica transmissão de potência e velocidade contínuas, mas com choques (“*shocks*”), e grande concentração de partículas poluentes. O valor do fator de aplicação foi obtido para um acionamento por um motor elétrico, para qual corresponde choques leves (“*Light shocks*”) e para uma caraterística de funcionamento do equipamento acionado de choques moderados (“*Moderate shocks*”);

| Working characteristics of the driving machine | Working characteristics of the driven machine |              |                 |                |
|--|---|--------------|-----------------|----------------|
|  | Uniform                                       | Light shocks | Moderate shocks | Heavy shocks   |
| Uniform  | 1,00  | 1,25         | 1,50            | 1,75           |
| Light shocks                                   | 1,10  | 1,35         | 1,60            | 1,85           |
| Moderate shocks                                | 1,25  | 1,50         | 1,75            | 2,00           |
| Heavy shocks                                   | 1,50  | 1,75         | 2,00            | 2,25 or higher |

Figura 5: Tabela com os valores do fator de aplicação,  $K_A$ , para as diferentes condições de funcionamento na entrada e na saída [12].

- conceção de configurações com engrenagens de dentado helicoidal;

As engrenagens helicoidais, com a sua maior capacidade de carga, enquadram-se melhor com a potência apresentada pelo redutor e permitem utilizar rodas dentadas de menores dimensões (módulo e largura), isto é, menor atravancamento destas e do conjunto.

### 3 Dimensionamento das Engrenagens

Após a contextualização do conceito de “*power split*”, a apresentação das especificações exigidas e a escolha do tipo de dentado das engrenagens, procede-se ao dimensionamento das engrenagens através dos softwares *KISSsys*<sup>®</sup> e *KISSsoft*<sup>®</sup>.

O dimensionamento das engrenagens abrange a adoção de configurações adequadas, envolvendo o dentado helicoidal simples e/ou duplo e tendo, sempre, como referência um entre-eixo baixo, e a comparação entre configurações. Esta fase termina com o pré dimensionamento dos veios e rolamentos, para auxiliar na escolha da melhor configuração.

#### 3.1 Dados técnicos

A caracterização de uma engrenagem necessita da prévia especificação dos parâmetros independentes caracterizadores da sua talhagem e funcionamento.

Os números de dentes,  $z_i$ , de cada roda dentada apresentam-se como o parâmetro de entrada mais importante a definir, uma vez que determinam a razão de transmissão efetiva de cada andar e a velocidade de saída efetiva do redutor. A sua escolha foi realizada, de modo a que a velocidade de saída apresente um erro relativo dentro dos limites definidos, -3% a 2%, em relação ao seu valor nominal [13].

Por outro lado, os números de dentes escolhidos para as rodas dentadas de cada andar devem conduzir a uma razão de transmissão de valor fracionário de dizima infinita periódica (um deles tem de ser ímpar), de forma a que, o contacto entre dois quaisquer dentes, não ocorra com frequência. Esta condição permite, assim, uniformizar o desgaste dos dentes [13].

O número de dentes deverá ser par no pinhão do primeiro andar ( pinhão  $z_1$ , Figura 10) e na roda do segundo andar (roda  $z_6$ , Figura 10), apresentando as restantes rodas dentadas número ímpar. Tal condição tem a ver com o equilíbrio de esforços na divisão de potência e, é uma forma de facilitar a montagem das rodas. Isto é, como o redutor é um “circuito fechado” no engrenamento das várias rodas dentadas, é necessário facilitar a montagem destas. A lógica de montagem é que dois dentes das rodas dentadas com número par de dentes engrene com um dente das rodas dentadas com número ímpar de dentes, permitindo que em ambos andares, tal consideração seja cumprida e fácil de elaborar. Caso não fosse implementada esta consideração, ter-se-ia de calcular a posição de alojamento dos componentes de acoplamento (chavetas e estriado), relativamente a uma referência comum destes componentes e das rodas dentadas e veios. Este último procedimento levaria a um conjunto de etapas de maquinagem dos vários componentes, com elevada precisão (custos de produção e dificuldades de elaboração maiores).

Quanto às correções de dentado, foram implementadas somas positivas dos coeficientes de desvio,  $x_i$ , visto que para uma soma, fortemente positiva, os coeficientes de segurança (coeficiente de segurança do flanco do dente,  $S_H$  e do pé,  $S_F$ , principalmente) e as perdas de potência diminuam. Foram preferidas correções positivas em ambas rodas dentadas de cada engrenamento. Tal condição tem como intuito conferir maior capacidade de carga e robustez aos dentes. Para tal, recorrendo ao relatório técnico ISO/TR 4467:1982, Figura 6, identificou-se o valor máximo da soma ( $\sum x$ ), bem como o de cada uma das correções individuais positivas, em função da soma ou do número de dentes, respetivamente. Para casos especiais, os valores positivos podem ser

superiores aos recomendados [14, 15].

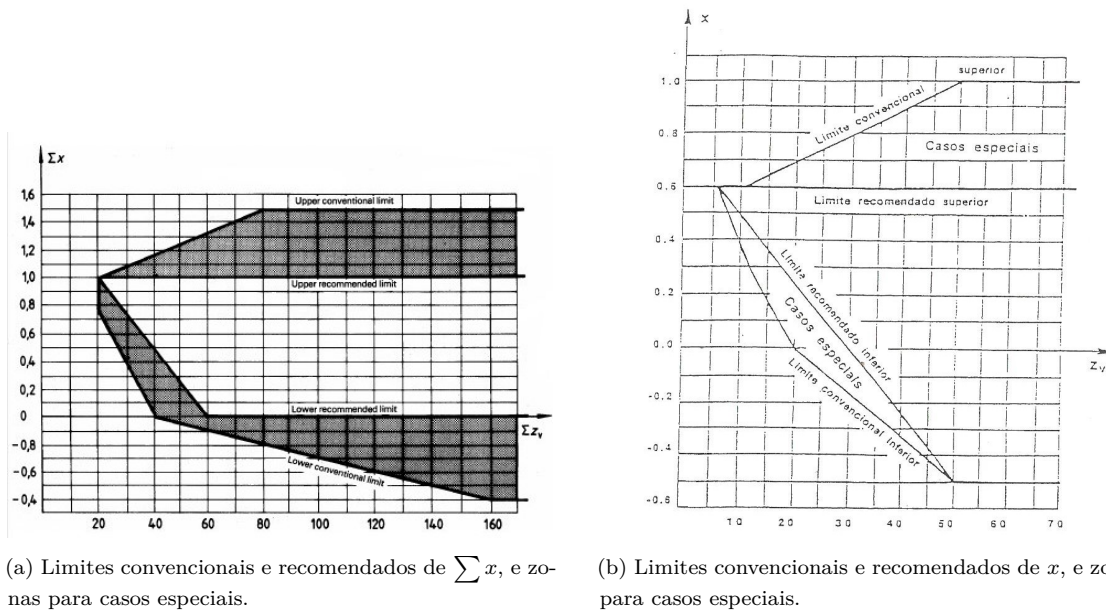


Figura 6: Fatores de deslocamento do perfil em função do número de dentes e da soma destes, respetivamente (ISO/TR 4467) [14]

Os ângulos de pressão  $\alpha_n$  mais utilizados industrialmente são:  $15^\circ$ ,  $17,5^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $22,5^\circ$  e  $25^\circ$ . O aumento de  $\alpha_n$  permite reforçar a base dos dentes e diminuir a pressão superficial nos seus flancos. Por outro lado, provoca uma redução da razão de condução aparente da engrenagem,  $\epsilon_\alpha$ , e o aumento da componente radial da força de contacto e dos esforços nos apoios dos veios. A normalização internacional, ISO 53:1998, fixa o valor do ângulo de pressão normal em  $\alpha_n=20^\circ$ . O valor do ângulo de pressão escolhido depende da aplicação e das exigências impostas, tendo-se implementado um valor de  $20^\circ$  para compensar as tensões de contacto elevadas [2].

A nível do ângulo de hélice,  $\beta$ , é importante distinguir os casos de helicoidal simples e helicoidal duplo. Para o dentado helicoidal simples é recomendado um valor entre  $10^\circ$  e  $15^\circ$ , mesmo que o aumento do ângulo  $\beta$  contribua para a redução do nível sonoro e aumente a capacidade de carga. Num dentado helicoidal duplo ou em espinha aconselha-se a utilização de ângulos superiores a  $30^\circ$  e de preferência à volta de  $35^\circ$  [2, 6]. No entanto, os valores escolhidos para este parâmetro foram de  $15^\circ$  para dentado helicoidal simples e de  $23^\circ$  e  $25^\circ$  para dentado helicoidal duplo (para obtenção das varias soluções), visto serem valores recomendados pela norma DIN 3978:1979, satisfazem a necessidade de ajuste dos entre-eixos para os módulos escolhidos e cumprem a indicação do *KISSsoft*® para valores inferiores a  $25^\circ$ , permitindo obter perdas de potência menores e aplicar a norma ISO 2545, responsável pelo cálculo ao “*micropitting*”.

Os módulos implementados, em cada andar do redutor, resultaram de um compromisso entre os valores sugeridos pelo software e os calculados segundo expressões que têm em conta a potência, a velocidade de rotação e o número de dentes. Deste modo, começou-se por adotar um módulo,  $m_n$ , para o primeiro andar de  $m_n=5$  ou  $m_n=6$  e um valor para o segundo andar de  $m_n=7$  ou  $m_n=8$ , obtendo-se as primeiras versões da configuração construtiva com engrenagens de dentado helicoidal simples.

Na seleção das versões, embora se considerassem módulos de primeira escolha ( $m_n = 5$ ,  $m_n = 6$  e  $m_n = 8$ ), nunca foi descartada qualquer outra combinação, desde que essa apresentasse

vantagens relativamente às outras.

As versões com engrenagens de módulos reduzidos (menor comprimento de engrenamento), apresentam menores perdas por desgaste [13].

O parâmetro de saída que teve uma importância acrescida, numa primeira fase, foi a razão de condução  $\varepsilon$ . Foi definido um valor mínimo para  $\varepsilon_\alpha$  de 1,4 e um valor de 1 para a razão de condução de hélice,  $\varepsilon_\beta$ .

Sabe-se que quanto maior for a razão de condução,  $\varepsilon$ , maior será a suavidade e a capacidade de carga no engrenamento. A norma NF E 23-013 aconselha que o valor de  $\varepsilon_\alpha$  seja superior a 1,3. Segundo G. Niemann, o valor de  $\varepsilon_\beta$  deve assumir valores inteiros, por exemplo 1, 2 ou 3, para se obter um comprimento de engrenamento constante no tempo, o qual conduz a uma rigidez constante no engrenamento (menores tensões dinâmicas) e a um melhor comportamento dinâmico (maior durabilidade das engrenagens) [6, 16]. Por outro lado, um valor de  $\varepsilon_\beta$  inteiro condiciona o valor da largura do dentado,  $b$ , diminuindo assim o número de configurações possíveis.

A maior capacidade de carga das engrenagens (maior pressão superficial e de rotura admissível, isto é, maior resistência ao “*pitting*” e à tensão na base dos dentes, respetivamente) resulta também do aumento da soma dos desvios (introduz um aumento da espessura na base dos dentes e uma diminuição da espessura na cabeça dos dentes). Tal aumento pode levar a dentes pontiagudos e encurtados, devendo a espessura na cabeça do dente,  $S_a$ , ser superior a  $0,2 m_n$  [6, 15].

A largura das rodas dentadas,  $b$ , foi escolhida de forma: a obter-se  $\varepsilon_\beta=1$ ; ao seu valor estar compreendido entre 8 a  $12 m_n$  e ser superior a  $\frac{\pi m_n}{\sin \beta}$ ; ao valor de  $b$  em relação ao diâmetro primitivo ser  $0,4 \leq \frac{b}{d_p} \leq 2,25$ , sendo aconselhado por Radzevich [6], que o valor desta razão seja inferior a 1 [2, 6].

Para concluir a lista de parâmetros necessários no dimensionamento das engrenagens, deve indicar-se o lubrificante e o tipo de lubrificação. Nesta primeira análise, arbitrou-se um óleo com as características de um mineral ISO-VG 220 e com valor 10 no teste ao “*micropitting*”, obtido no software *KISSsoft*®. Quanto ao tipo de lubrificação considerou-se a chapinagem, uma vez que, se prevê uma velocidade tangencial, no primitivo, inferior a 10-15 m/s. A velocidade tangencial não deve ser elevada, de modo a evitar a expulsão do óleo do dentado (ação da força centrífuga) e o aquecimento do óleo por agitação (diminuição da sua viscosidade e correspondentes propriedades lubrificantes).

Reunindo todas as condições, apresentadas anteriormente, pretende-se encontrar, de entre todas as configurações possíveis, aquela que apresente o melhor compromisso entre:

- menor entre-eixo de funcionamento  $a'$ ;
- menores dimensões das rodas dentadas;
- coeficientes de segurança próximos dos mínimos;
- menor coeficiente de atrito,  $\mu$ ;
- maior espessura específica mínima do filme lubrificante,  $\lambda_{min}$ ;

- menor massa;
- menores perdas de potência,  $P_{VZP}$  (maior rendimento);
- menor velocidade tangencial no primitivo de funcionamento,  $v_{dw}$ ;
- menor velocidade de escorregamento,  $v_{ga}$ ;
- menores esforços axiais,  $Fa_w$  e normais,  $Fn_w$ , no primitivo de funcionamento;

A solução funcional para o problema foi obtida aplicando um procedimento com evolução gradual e com recurso constante à comparação de configurações, tal como descrito no diagrama da Figura 7.

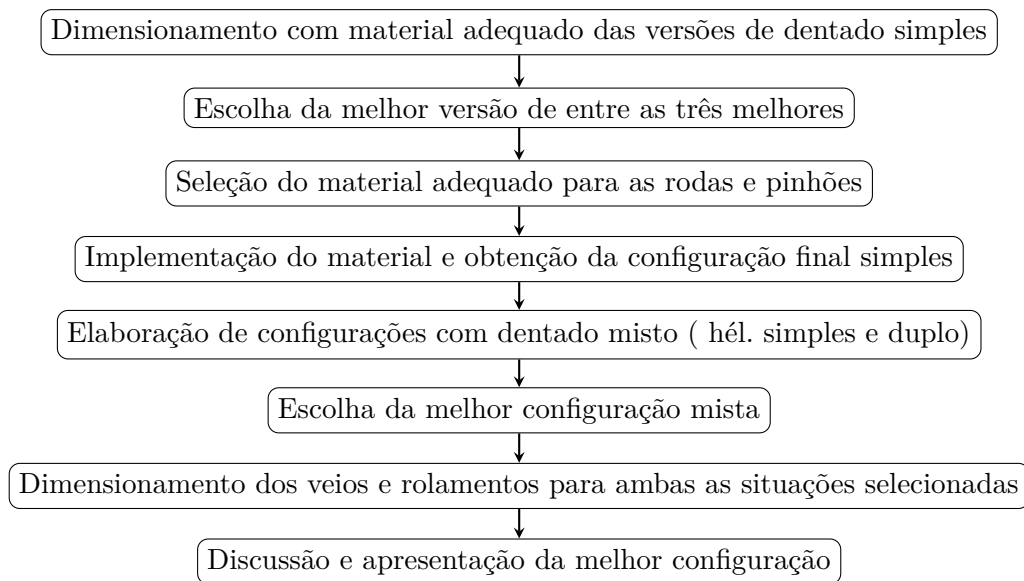


Figura 7: Diagrama de elaboração de soluções

## 3.2 Software

Os softwares utilizados no dimensionamento constituem uma ferramenta de cálculo completa e precisa, apresentando uma grande aplicabilidade no dimensionamento deste género de mecanismos.

Estes softwares, quando combinados, permitem o dimensionamento não só de engrenagens, como também de todos os outros componentes que carecem de cálculo, como por exemplo: rolamentos, veios, acoplamentos, etc. Consegue-se também realizar uma análise energética do sistema completo.

O *KISSsys*<sup>®</sup> funciona como um software de identificação de componentes e de algumas das suas características. Consegue-se representar o sistema com todos os componentes que precisam de ser dimensionados, que são montados uns relativamente aos outros como na montagem real.

O *KISSsoft*<sup>®</sup> é o que permite fazer o cálculo dos vários componentes. Existe uma ligação entre estes softwares, que permite uma permuta de dados, complementando-se um ao outro.

Os softwares fornecem o relatório de dimensionamento dos componentes e as representação 2D e 3D da sua configuração.



Todos os parâmetros que caracterizam as engrenagens, anteriormente abordados, são introduzidos nos softwares para a obtenção das soluções.

O resultado do dimensionamento das duas arquiteturas concebidas, *Arquitetura Simples* (configuração com engrenagens de dentado helicoidal simples em ambos os andares) e *Arquitetura Mista* (configuração com engrenagens de dentado helicoidal simples no primeiro andar e duplo no segundo andar), após implementação no *KISSsys*<sup>®</sup>, é evidenciado na Figura 8, e o esquema genérico da cadeia cinemática do redutor na Figura 9.

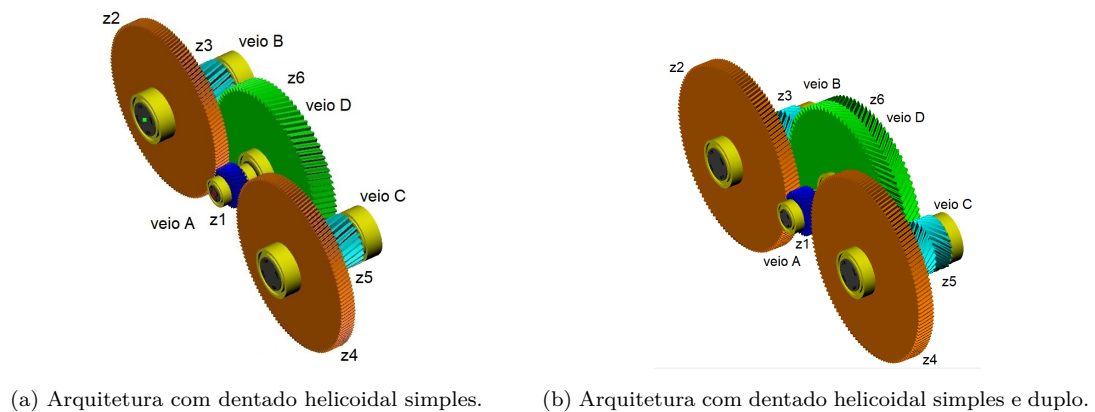


Figura 8: Arquitetura simples e arquitetura mista para o redutor a conceber [KISSsys<sup>®</sup>].

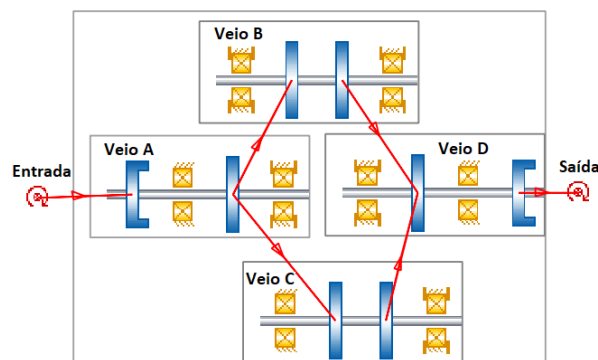


Figura 9: Esquema da cadeia cinemática do redutor [KISSsys<sup>®</sup>].

O dimensionamento das engrenagens no *KISSsoft*<sup>®</sup> foi realizado segundo o Método B da norma DIN 3990, a qual é equivalente à ISO 6336. Optou-se pelo Método B, face ao restantes métodos (A, C e D), uma vez que é o método que recorre a fatores de influência, que traduzem, perfeitamente, o caso real e apresenta uma aplicação geral. Este método permite realizar o dimensionamento por cálculo numérico, visto que os fatores podem ser calculados por meio de expressões. Os fatores são designados pela maiúscula  $K$  com um índice, tais como:  $K_A$  - fator de aplicação;  $K_V$  - fator dinâmico;  $K_{F\beta}$ ,  $K_{H\beta}$  - fator de distribuição de carga longitudinal no pé e flanco do dente, respetivamente;  $K_{F\alpha}$ ,  $K_{H\alpha}$  - fator de distribuição da carga transversal no pé e flanco do dente, respetivamente [17].

O único fator introduzido foi o  $K_A$ , sendo os restantes calculados pelo *KISSsoft*<sup>®</sup> através das expressões correspondentes [18].

Os valores dos coeficientes de segurança calculados pelo *KISSsoft*<sup>®</sup>, e utilizados na compa-

ração e seleção das soluções, apresentam individualmente um significado particular. O fator de segurança no flanco dente,  $S_H$ , representa o sobre-dimensionamento do dentado face à pressão superficial verificada, uma vez que ao dentado está associado uma resistência à pressão superficial (“*pitting*”). Este coeficiente de segurança mínimo, segundo a norma DIN 3990, é de 1.

O coeficiente de segurança no pé do dente,  $S_F$ , representa a relação entre a tensão no pé do dente e a resistência à flexão e fadiga no pé do dente (resistência limite no pé do dente). O valor deste coeficiente mínimo é de 1,4.

Foram considerados, também, os coeficientes de segurança à gripagem, para o método da temperatura integral,  $S_{Sint}$ , e para o método da temperatura instantânea,  $S_B$ . Os valores dos coeficientes mínimos são 1,8 e 2, respetivamente [19, 20]. Estes fatores são importantes para identificarem a tendência de ocorrência que este fenómeno apresenta. Sabe-se, que na presença de alta pressão e temperatura, sem qualquer proteção da superfície, os flancos em contacto unem-se e com a energia cinética do movimento são imediatamente separados, ocorrendo raspagem nas áreas desses flancos, tipicamente perto da raiz e da cabeça do dente (locais de elevada velocidade de deslizamento) [20].

Outro coeficiente de segurança considerado foi ao “*micropitting*”, que é determinado segundo o relatório técnico ISO/TR 15144-1:2014 e representa a resistência à ocorrência deste fenómeno.

O “*micropitting*” ocorre, essencialmente, por questões de lubrificação deficitária (engrenagens que operam sob condições de lubrificação mista ou limite). Este constitui-se como uma fadiga superficial que ocorre principalmente, no “*dedendum*” dos flancos sobre condições de deslizamento negativo. Com o aumento da dinâmica e falhas secundárias, este fenómeno pode conduzir a uma perda de material inaceitável. Deste modo, deve-se melhorar a resistência através de: modificações no perfil do dentado; diminuição da rugosidade de superfície; aumento da viscosidade e aditivos do lubrificante, etc.

De maneira a iniciar o processo de dimensionamento das engrenagens das várias configurações possíveis, apresenta-se na Figura 10, o esquema do redutor e a nomenclatura adotada para os componentes em análise.

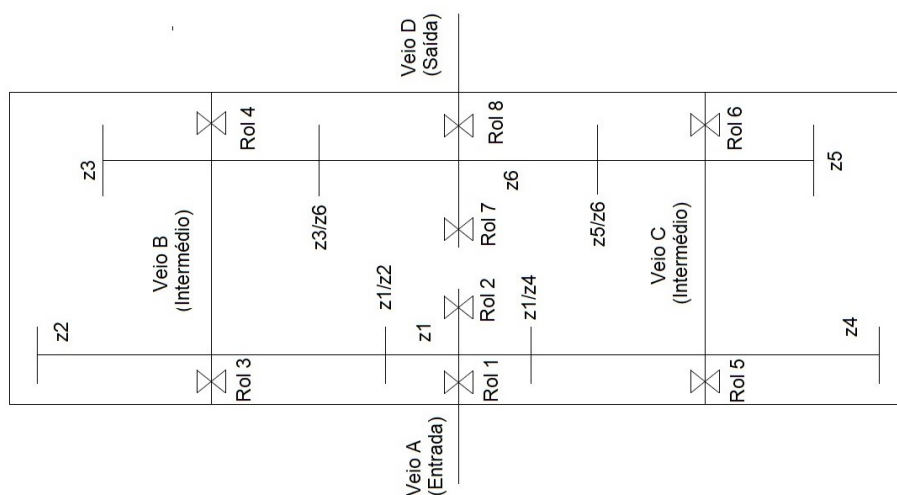


Figura 10: Esquema da configuração do redutor, com a indicação da nomenclatura dos respetivos componentes.

### 3.3 Configurações com dentado helicoidal simples

Primeiramente, é necessário definir o material adequado a aplicar nas rodas dentadas para as condições de funcionamento (potência e velocidade de entrada elevadas) desta aplicação.

Segundo várias referências, o material adequado é um aço de cementação, com tratamento térmico de cementação e, geralmente, retificado. Estas referências indicam uma lista de materiais adequados, tendo sido escolhido o aço 18 CrNiMo 7, que apresenta endurecimento superficial e no núcleo (“core”) e as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade,  $E$ , tensão limite de elasticidade,  $\sigma_S$ , tensão limite de ruptura,  $\sigma_B$ ) e designações enunciadas na Tabela 1 [21, 22].

Tabela 1: Propriedades mecânicas e designações do aço 18 CrNiMo 7 [23].

| Ramada      | EURONORM    | $E$ [GPa] | $\sigma_S$ [MPa] | $\sigma_B$ [MPa] | Dureza<br>core [HB] | Dureza<br>surface [HRC] |
|-------------|-------------|-----------|------------------|------------------|---------------------|-------------------------|
| G15 Special | 18 CrNiMo 7 | 206       | 850              | 1200             | 325                 | 61                      |

Outro parâmetro que pode ser alterado é a rugosidade da superfície do dente, que influencia, principalmente, o coeficiente de segurança no flanco do dente,  $S_H$ , o coeficiente de atrito,  $\mu$ , as perdas de potência,  $P_{VZP}$ , e a espessura específica de filme lubrificante no engrenamento,  $\lambda_{min}$ .

Para alcançar o coeficiente de segurança mínimo, no flanco do dente, reduziu-se a rugosidade neste, no segundo andar. Nestas primeiras configurações, os andares apresentam uma rugosidade média aritmética no flanco,  $Ra_H$ , e no pé do dente,  $Ra_F$ , e uma rugosidade média dos picos máximos no flanco,  $Rz_H$  e no pé do dente,  $Rz_F$ , indicadas na Tabela 2. A orientação da rugosidade também contribuir para melhorar os parâmetros abordados. Esta é definida pelo processo de talhagem selecionado para a elaboração do dentado.

Tabela 2: Rugosidades na superfície dos dentes nas configurações iniciais com dentado helicoidal simples [KISSsoft®].

|         | $Ra_H$ [ $\mu m$ ] | $Ra_F$ [ $\mu m$ ] | $Rz_H$ [ $\mu m$ ] | $Rz_F$ [ $\mu m$ ] |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Andar 1 | 0,6                | 3                  | 4,8                | 20                 |
| Andar 2 | 0,4                | 3                  | 2,4                | 20                 |

Após a obtenção das três melhores configurações, em dentado helicoidal simples, utilizando o aço 18 CrNiMo 7, constatou-se que, devido às elevadas dimensões das rodas, não seria possível realizar um tratamento térmico de cementação. O tratamento não pôde ser realizado devido à dificuldade de alojar as rodas no forno e conseguir obter os resultados pretendidos para este tratamento térmico [21, 22].

Perante esta situação, projetou-se uma redução de massa para as rodas (z2,z4 e z6), pelo que foi necessário prever o seu processo de fabrico para a sua obtenção. Para o processo de fabrico optou-se pela fundição, deixando a construção soldada para uma segunda escolha. Por sua vez, para o tratamento térmico, optou-se por uma têmpera por indução ou chama. Ambas as

seleções efetuadas (processo de fabrico e tratamento térmico) condicionam a escolha do material.

Este tratamento térmico permite, sobretudo, aumentar a dureza na superfície dos dentes. A dureza superficial depende da espessura da camada endurecida, do diâmetro e do módulo das rodas e do processo de endurecimento ser: por indução ou chama. Quando a têmpera é realizada por chama, a camada endurecida é superior. Apresenta, no entanto, a desvantagem da superfície ficar carbonizada, exigindo uma retificação desta, de modo a remover a camada gerada [21, 22].

A seleção do material foi baseada nas vertentes construtiva e dimensional. Para tal, foi consultada bibliografia, Maag gear company LTD [21], Henriot [22] e Ramada Aços® [23], obtendo-se indicações de materiais adequados que, posteriormente, foram testados na configuração simples escolhida, apresentando-se os resultados, na Tabela 6.

Para os pinhões z3 e z5 (pinhões do segundo andar, Figura 10), partiu-se do princípio que estes seriam veios-pinhão, devido aos elevados momentos torsores. Perante uma situação deste tipo, o material será igual no veio e no pinhão, tendo de ser selecionado para ambas as aplicações.

Na Tabela 3, apresentam-se os materiais utilizados nos pinhões, rodas e veios da configuração simples escolhida (*Arquitetura Simples*), e na Tabela 4, indicam-se as propriedades do aço 36 CrNiMo 4.

O material escolhido para cada roda dentada satisfaz as necessidades exigidas mas não provoca o elevado sobredimensionamento.

Tabela 3: Materiais utilizados nas configurações com dentado helicoidal simples.

| Material             | Configurações simples iniciais                             | Configuração simples escolhida                               |
|----------------------|--|--|
| <b>Roda</b>          | 18 CrNiMo 7 - Aço de cementação, endurecido por cementação | 36 CrNiMo 4 - Aço beneficiado, temperado à chama por indução |
| <b>Pinhão</b>        | 18 CrNiMo 7 - Aço de cementação, endurecido por cementação | 18 CrNiMo 7 - Aço de cementação, endurecido por cementação   |
| <b>Veio - Pinhão</b> | 18 CrNiMo 7 - Aço de cementação, endurecido por cementação | 18 CrNiMo 7 - Aço de cementação, endurecido por cementação   |

Tabela 4: Propriedades mecânicas do aço 36 CrNiMo 4 [*KISSsoft*®].

| EURONORM    | $E$ [GPa] | $\sigma_S$ [MPa] | $\sigma_B$ [MPa] | Dureza<br>core [HB] | Dureza<br>surface [HRC] |
|-------------|-----------|------------------|------------------|---------------------|-------------------------|
| 36 CrNiMo 4 | 206       | 900              | 1100             | 210                 | 56                      |

#### 3.3.1 Resultados e comentários

Utilizando os parâmetros de compromisso apresentados na Secção 3.1, nas Tabelas 7 e 8 indicam-se os valores das variáveis associadas a estes, para cada uma das três configurações simples obtidas (*Configuração Simples 1*, *Configuração Simples 2* e *Configuração Simples 3*).

As Tabelas 5 e 6 apresentam os dados inerentes às configurações com dentado helicoidal simples, discretizando os valores de massa e dimensionais das rodas dentadas.

As três primeiras configurações reúnem todos os requisitos pretendidos, podendo qualquer uma delas ser a solução da conceção. No entanto, fazendo uma análise comparativa mais detalhada, a *Configuração Simples 3* é a que reúne uma melhor qualidade.

Os pormenores que levaram à escolha desta configuração passam por:

- valores de  $\sum x$  com menor discrepância entre andares;

Permite aumentar o valor da soma da correção de dentado em ambos os andares para valores próximos dos limites, permitindo obter uma diminuição das perdas de potência e melhores coeficientes de segurança.

- valores de correção de dentado positivas em ambas as rodas dentadas, em cada andar;
- reduções fracionarias e módulos de primeira escolha;
- maiores coeficientes de segurança, principalmente no segundo andar (situação mais critica);
- melhor relação dimensão/massa e menores perdas, mesmo que não seja a que apresenta o menor entre-eixo;
- menor valor das forças axial e normal, de modo geral, o que a nível de dimensionamento se torna vantajoso;
- menor coeficiente de atrito e maior espessura específica mínima do filme lubrificante, além dos valores não apresentarem diferenças significativas;
- maior rendimento, além dos valores serem praticamente iguais nas três soluções.

Tabela 5: Características dimensionais e de massa da *Configuração Simples 1* e *Configuração Simples 2* [KISSsoft®].

|                   | <i>Configuração Simples 1</i> |         |         |         | <i>Configuração Simples 2</i> |         |         |         |
|-------------------|-------------------------------|---------|---------|---------|-------------------------------|---------|---------|---------|
|                   | Andar 1                       |         | Andar 2 |         | Andar 1                       |         | Andar 2 |         |
|                   | Pinhão                        | Roda    | Pinhão  | Roda    | Pinhão                        | Roda    | Pinhão  | Roda    |
| $m_n$ [mm]        | 5                             |         | 7       |         | 6                             |         | 8       |         |
| $z$               | 30                            | 135     | 25      | 92      | 24                            | 115     | 23      | 80      |
| $\beta$ [°]       | 15                            |         | 15      |         | 15                            |         | 15      |         |
| $b$ [mm]          | 60,7                          |         | 85      |         | 72,8                          |         | 97,1    |         |
| $a'$ [mm]         | 427,5                         |         | 427,5   |         | 433,5                         |         | 433,5   |         |
| $x$               | 0,081                         | 0,009   | 0,357   | 0,165   | 0,339                         | -0,036  | 0,443   | 0,475   |
| $\sum x$          | 0,090                         |         | 0,522   |         | 0,303                         |         | 0,918   |         |
| $d_a$ [mm]        | 163,456                       | 704,402 | 200,017 | 683,154 | 164,872                       | 704,118 | 212,609 | 683,83  |
| $d_w$ [mm]        | 150,871                       | 697,129 | 182,772 | 672,622 | 149,353                       | 715,674 | 193,155 | 671,845 |
| Massa [kg]        | 8,8                           | 181,5   | 17,6    | 249,1   | 10,1                          | 227     | 22,4    | 206     |
| <b>Total</b> [kg] | 372                           |         | 284     |         | 464                           |         | 251     |         |

### 3. Dimensionamento das Engrenagens

Tabela 6: Características dimensionais e de massa da *Configuração Simples 3* e *Arquitetura Simples* [KISSsoft®].

|             | <i>Configuração Simples 3</i> |         |         |         | <i>Arquitetura Simples</i> |         |         |         |
|-------------|-------------------------------|---------|---------|---------|----------------------------|---------|---------|---------|
|             | Andar 1                       |         | Andar 2 |         | Andar 1                    |         | Andar 2 |         |
|             | Pinhão                        | Roda    | Pinhão  | Roda    | Pinhão                     | Roda    | Pinhão  | Roda    |
| $m_n$ [mm]  | 5                             |         | 8       |         | 5                          |         | 8       |         |
| $z$         | 30                            | 139     | 23      | 82      | 30                         | 139     | 23      | 82      |
| $\beta$ [°] | 15                            |         | 15      |         | 15                         |         | 15      |         |
| $b$ [mm]    | 60,7                          |         | 97,1    |         | 60,7                       |         | 97,1    |         |
| $a'$ [mm]   | 440                           |         | 440     |         | 440                        |         | 440     |         |
| $x$         | 0,327                         | 0,203   | 0,398   | 0,276   | 0,327                      | 0,203   | 0,398   | 0,276   |
| $\sum x$    | 0,5298                        |         | 0,5224  |         | 0,5298                     |         | 0,6742  |         |
| $d_a$ [mm]  | 168,458                       | 731,436 | 212,440 | 699,143 | 168,458                    | 731,436 | 212,440 | 699,143 |
| $d_w$ [mm]  | 156,213                       | 723,787 | 192,762 | 687,238 | 156,213                    | 723,787 | 192,762 | 687,238 |
| Massa [kg]  | 9,1                           | 193,5   | 22,4    | 277     | 9,1                        | 193,5   | 22,4    | 277     |
| Total [kg]  | 396                           |         | 321     |         | 396                        |         | 322     |         |

Tabela 7: Coeficientes de segurança, esforços e dados de funcionamento e energéticos da *Configuração Simples 1* e da *Configuração Simples 2* [KISSsoft®].

|                      | <i>Configuração Simples 1</i> |      |         |      | <i>Configuração Simples 2</i> |       |         |       |
|----------------------|-------------------------------|------|---------|------|-------------------------------|-------|---------|-------|
|                      | Andar 1                       |      | Andar 2 |      | Andar 1                       |       | Andar 2 |       |
|                      | Pinhão                        | Roda | Pinhão  | Roda | Pinhão                        | Roda  | Pinhão  | Roda  |
| $S_F$                | 2,65                          | 1,51 | 1,42    | 1,41 | 3,54                          | 3,26  | 1,76    | 1,63  |
| $S_H$                | 1,85                          | 1,85 | 1,24    | 1,24 | 1,89                          | 1,89  | 1,34    | 1,34  |
| $S_{Sint}$           | 4,40                          |      | 3,41    |      | 4,29                          |       | 3,62    |       |
| $S_B$                | 5,61                          |      | 3,90    |      | 7,22                          |       | 4,20    |       |
| $S_{micro}$          | 2,73                          |      | 1,61    |      | 2,99                          |       | 1,88    |       |
| $\varepsilon_\alpha$ | 1,658                         |      | 1,525   |      | 1,553                         |       | 1,449   |       |
| $v_w$ [m/s]          | 8,14                          |      | 2,13    |      | 7,84                          |       | 2,12    |       |
| $v_{ga}$ [m/s]       | 1,614                         |      | 0,562   | 0,4  | 2,151                         | 1,439 | 0,573   | 0,414 |
| $Fa_w$ [kN]          | 6,179                         |      | 23,833  |      | 6,436                         |       | 24,136  |       |
| $Fn_w$ [kN]          | 25,592                        |      | 103,549 |      | 27,221                        |       | 109,818 |       |
| $P_{VZP}$ [kW]       | 0,84                          |      | 1,312   |      | 1,002                         |       | 1,262   |       |
| $\lambda_{min}$      | 0,663                         |      | 0,393   |      | 0,727                         |       | 0,456   |       |
| $\mu$                | 0,047                         |      | 0,062   |      | 0,046                         |       | 0,102   |       |
| <b>Rend.</b> [%]     | 99,524                        |      | 99,304  |      | 99,451                        |       | 99,31   |       |



Tabela 8: Coeficientes de segurança, esforços e dados de funcionamento e energéticos da *Configuração Simples 3* e da *Arquitetura Simples* [KISSsoft®].

|                      | <i>Configuração Simples 3</i> |       |         |       | <i>Arquitetura Simples</i> |       |         |       |
|----------------------|-------------------------------|-------|---------|-------|----------------------------|-------|---------|-------|
|                      | Andar 1                       |       | Andar 2 |       | Andar 1                    |       | Andar 2 |       |
|                      | Pinhão                        | Roda  | Pinhão  | Roda  | Pinhão                     | Roda  | Pinhão  | Roda  |
| $S_F$                | 2,61                          | 2,37  | 1,84    | 1,71  | 2,61                       | 2,04  | 1,84    | 1,47  |
| $S_H$                | 1,84                          | 1,84  | 1,36    | 1,36  | 1,84                       | 1,5   | 1,31    | 1,06  |
| $S_{Sint}$           | 4,44                          |       | 3,62    |       | 4,47                       |       | 3,46    |       |
| $S_B$                | 8,91                          |       | 4,29    |       | 8,91                       |       | 3,76    |       |
| $S_{micro}$          | 3,45                          |       | 1,83    |       | 4,24                       |       | 1,42    |       |
| $\varepsilon_\alpha$ | 1,58                          |       | 1,48    |       | 1,58                       |       | 1,48    |       |
| $v_w$ [m/s]          | 8,18                          |       | 2,18    |       | 8,18                       |       | 2,18    |       |
| $v_{ga}$ [m/s]       | 1,776                         | 1,285 | 0,611   | 0,432 | 1,776                      | 1,285 | 0,611   | 0,432 |
| $Fa_w$ [kN]          | 6,179                         |       | 23,339  |       | 6,179                      |       | 23,339  |       |
| $Fn_w$ [kN]          | 26,437                        |       | 103,574 |       | 26,437                     |       | 103,574 |       |
| $\lambda_{min}$      | 0,853                         |       | 0,449   |       | 0,850                      |       | 0,284   |       |
| $\mu$                | 0,046                         |       | 0,057   |       | 0,046                      |       | 0,063   |       |
| $P_{VZP}$ [kW]       | 0,805                         |       | 1,297   |       | 0,805                      |       | 1,436   |       |
| <b>Rend.</b> [%]     | 99,557                        |       | 99,308  |       | 99,571                     |       | 99,234  |       |

A seleção do material a aplicar nas rodas z2, z4 e z6 (Figura 10) realizou-se segundo um processo iterativo (iniciado no segundo andar do redutor, o mais crítico do equipamento), tendo como referências a obtenção de coeficientes de segurança próximos dos mínimos requeridos e valores melhorados para as restantes variáveis energéticas.

A alteração de material permitiu impor uma rugosidade da superfície das engrenagens do segundo andar, superior à apresentada na *Configuração Simples 3* e igual à do primeiro andar e, simultaneamente, obter coeficientes de segurança, no flanco ( $S_H$ ) e no pé ( $S_F$ ) do dente, superiores aos mínimos necessários.

No entanto, a alteração da rugosidade contribuiu, negativamente, para alguns parâmetros, como se pode verificar na Tabela 8. Estas alterações são notórias no segundo andar, visto tratar-se do andar sujeito a condições mais adversas e o local de alteração da rugosidade.

O contributo negativo não assume uma importância acrescida. É preferível possuir uma rugosidade maior, a ter que realizar retificações mais precisas, associadas a processos mais demorados e onerosos. Caso se pratique uma retificação mais fina, sabe-se à partida que todos os parâmetros inerentes à energia irão melhorar.

### 3.4 Configurações com dentado helicoidal simples e duplo

Face aos valores dos esforços da *Arquitetura Simples*, indicados na Tabela 8, verifica-se que estes são elevados, principalmente no segundo andar. Destaca-se o esforço axial, por exercer uma força e gerar um momento fletor nas engrenagens respetivas. Deste modo, o esforço axial leva a que os apoios fiquem sujeitos a um esforço axial e a um esforço radial resultante do momento fletor.

A forma de eliminar o contributo do esforço axial é a aplicação de dentado helicoidal duplo. Optou-se, assim, por construir um redutor com dentado helicoidal simples, no primeiro andar, e dentado helicoidal duplo no segundo.

Esta solução aumentará a largura das rodas dentadas do segundo andar, uma vez que se pretende manter o mesmo valor de  $\varepsilon_\beta$ , valor inteiro e unitário. A largura aumenta visto que apenas 50% da largura do dentado contribuiu para o cálculo do valor de  $\varepsilon_\beta$  e também surge a necessidade de elaborar uma ranhura central, responsável por facilitar a saída da ferramenta de corte na talhagem dos dentes.

O objetivo desta etapa é, caso possível, a obtenção de configurações que apresentem valores de entre-eixo menores ou iguais ao da *Arquitetura Simples*, e engrenagens com reduzido acréscimo de largura e peso.

Um valor de  $\varepsilon_\beta$  igual ao da *Solução Simples*, conduz a um dentado helicoidal duplo ou em espinha com maior capacidade de carga, isto é, engrenagens sobredimensionadas. Tal facto permite diminuir o módulo, e assim melhorar as perdas de potência, diminuir as velocidades de escorregamento e o comprimento de engrenamento. Por outro lado, a diminuição do módulo permitirá obter configurações com menores diâmetros, compensando, assim, o aumento de massa resultante do aumento da largura.

Além destas vantagens, o dentado helicoidal duplo permite, na presença de baixos módulos, aplicar valores de ângulos de hélice de  $25^\circ$ . Isso permite, facilmente, baixar a largura das rodas, obtendo-se um menor atravancamento e um maior número de combinações possíveis para o problema. Em dentado helicoidal duplo, os ângulos de hélice elevados não causam problemas a nível dos esforços axiais, uma vez que estes se anulam.

#### 3.4.1 Resultados e comentários

Nesta etapa, foram estabelecidos dois grupos de configurações. Um continha as configurações que apresentavam módulos iguais aos da *Arquitetura Simples*, e o outro as configurações com menor módulo no segundo andar comparativamente ao apresentado na *Arquitetura Simples*.

Foi escolhida a melhor configuração de cada grupo, respetivamente, apresentadas nas Tabelas 9 e 10. A escolha realizada baseou-se nos seguintes parâmetros: menor atravancamento; menor peso; equilíbrio na soma da correção de dentado entre andares e melhores coeficientes de segurança.

Os resultados apresentados permitem, numa primeira abordagem, comprovar o que foi exposto anteriormente e, numa segunda abordagem, escolher a *Configuração Mista 2* como a configuração mais adequada para o redutor (apesar de esta apresentar um módulo de segunda

escolha). A *Configuração Mista 2* passa a ser a *Arquitetura Mista* e configuração selecionada para otimização.

Esta configuração foi escolhida devido a:

- menor entre-eixo de funcionamento;
- largura das engrenagens do segundo andar menor que, conjuntamente com as menores dimensões das engrenagens, permite obter uma massa semelhante à da *Arquitetura Simples*;
- valores de coeficientes de segurança superiores e próximos aos mínimos exigidos em ambos os andares, traduzindo-se numa solução menos sobredimensionada;
- menores velocidades de escorregamento.

Tabela 9: Características dimensionais e de massa da *Configuração Mista 1* e da *Configuração Mista 2* [KISSsoft®].

|             | <i>Configuração Mista 1</i> |         |         |         | <i>Configuração Mista 2</i> |         |         |         |
|-------------|-----------------------------|---------|---------|---------|-----------------------------|---------|---------|---------|
|             | Andar 1                     |         | Andar 2 |         | Andar 1                     |         | Andar 2 |         |
|             | Pinhão                      | Roda    | Pinhão  | Roda    | Pinhão                      | Roda    | Pinhão  | Roda    |
| $m_n$ [mm]  | 5                           |         | 8       |         | 5                           |         | 7       |         |
| $z$         | 32                          | 139     | 21      | 80      | 30                          | 133     | 23      | 86      |
| $\beta$ [°] | 15                          |         | 23      |         | 15                          |         | 25      |         |
| $b$ [mm]    | 60,7                        |         | 138,6   |         | 60,70                       |         | 114,10  |         |
| $a'$ [mm]   | 444,5                       |         | 444,5   |         | 424                         |         | 424     |         |
| $x$         | 0,294                       | 0,096   | 0,399   | 0,330   | 0,312                       | 0,120   | 0,327   | 0,120   |
| $\sum x$    | 0,3897                      |         | 0,729   |         | 0,432                       |         | 0,447   |         |
| $d_a$ [mm]  | 178,524                     | 730,417 | 204,455 | 716,103 | 168,339                     | 699,587 | 196,088 | 679,776 |
| $d_w$ [mm]  | 166,363                     | 722,637 | 184,842 | 704,158 | 156,074                     | 691,926 | 178,936 | 669,064 |
| Massa [kg]  | 10,3                        | 192,9   | 27,2    | 385,3   | 9                           | 176,7   | 22,6    | 309,2   |
| Total [kg]  | 396                         |         | 440     |         | 362.5                       |         | 354     |         |

Tabela 10: Coeficientes de segurança, esforços e dados de funcionamento e energéticos da *Configuração Mista 1* e *Configuração Mista 2* [KISSsoft®].

|                      | <i>Configuração Mista 1</i> |       |         |      | <i>Configuração Mista 2</i> |       |         |       |
|----------------------|-----------------------------|-------|---------|------|-----------------------------|-------|---------|-------|
|                      | Andar 1                     |       | Andar 2 |      | Andar 1                     |       | Andar 2 |       |
|                      | Pinhão                      | Roda  | Pinhão  | Roda | Pinhão                      | Roda  | Pinhão  | Roda  |
| $S_F$                | 2,76                        | 2,17  | 2,73    | 2,17 | 2,62                        | 2,06  | 1,96    | 1,57  |
| $S_H$                | 1,94                        | 1,58  | 1,54    | 1,25 | 1,83                        | 1,49  | 1,34    | 1,09  |
| $S_{Sint}$           | 4,60                        |       | 3,94    |      | 4,44                        |       | 3,61    |       |
| $S_B$                | 9,23                        |       | 4,97    |      | 8,72                        |       | 3,98    |       |
| $S_{micro}$          | 4,69                        |       | 1,38    |      | 4,15                        |       | 1,16    |       |
| $\varepsilon_\alpha$ | 1,606                       |       | 1,37    |      | 1,588                       |       | 1,399   |       |
| $v_w$ [m/s]          | 8,71                        |       | 2,23    |      | 8,17                        |       | 2,11    |       |
| $v_{ga}$ [m/s]       | 1,814                       | 1,335 | 0,621   | 0,44 | 1,799                       | 1,303 | 0,548   | 0,395 |
| $Fa_w$ [kN]          | 5,793                       |       | 0       |      | 6,179                       |       | 0       |       |
| $Fn_w$ [kN]          | 24,530                      |       | 106,141 |      | 26,285                      |       | 109,516 |       |
| $\lambda_{min}$      | 0,940                       |       | 0,276   |      | 0,832                       |       | 0,232   |       |
| $\mu$                | 0,045                       |       | 0,057   |      | 0,047                       |       | 0,063   |       |
| $P_{VZP}$ [kW]       | 0,741                       |       | 1,387   |      | 0,820                       |       | 1,417   |       |
| <b>Rend.</b> [%]     | 99,605                      |       | 99,260  |      | 99,562                      |       | 99,244  |       |

### 3.5 Análise dos esforços nos apoios

Perante os elevados esforços axiais e normais da *Arquitetura Simples* e da *Arquitetura Mista*, é importante analisar os esforços descarregados nos apoios e a sua relação com o sentido de rotação (horário e anti-horário), o tipo de dentado (simples ou duplo) e a orientação do dente (roda dentada direita ou esquerda).

Para a *Arquitetura Simples* (configuração com dentado helicoidal simples em ambos os andares), a configuração que permite o melhor resultado dos esforços nos apoios é a que apresenta a mesma orientação de dentado para o pinhão de entrada (pinhão z1) e para a roda de saída (roda z6), Figura 8a. As restantes engrenagens terão de apresentar uma orientação oposta.

Esta configuração é a melhor, pois leva a uma subtração dos esforços radiais (direções perpendiculares ao eixo) e axiais (direção do eixo) nos apoios dos veios B e C (veios intermédios), resultantes dos esforços dos engrenamentos desses veios. Os esforços radiais (direções perpendiculares ao eixo) e axiais (direção do eixo), nos apoios dos veios A e D seriam iguais para qualquer combinação de orientações. Para melhor compreensão podem ser analisadas as figuras do Anexo B (Pág. 131).

Ainda na *Arquitetura Simples*, a orientação dos dentes juntamente com o sentido de rotação, leva a quatro situações diferentes. Tal acontece porque o sentido de rotação determina o sentido da força tangencial, e o sentido de rotação com a orientação do dente determinam o sentido da força axial, do engrenamento.

Com a análise dos esquemas da Figura 11, onde cada roda dentada aplica os esforços indicados na roda dentada conjugada, facilmente se compreende o que anteriormente foi dito, e permite tomar uma decisão quanto à escolha da configuração (tipo de dentado e orientação do dentado) e sentido de rotação.

Verifica-se que, na ausência do peso, as situações se reduzem a duas, uma vez que o sentido de rotação horário com roda dentada direita apresenta os mesmos esforço radial resultante,  $F_R$ , e o esforço axial,  $F_a$ , nos apoios, que o sentido de rotação anti-horário com roda dentada esquerda, e as outras duas combinações constituíam, também, uma só. Visto que o peso,  $Q$ , perante os valores das forças não apresenta um contributo elevado, poder-se-á concluir que a definição de só dois grupos podia ser realizada, e como nesta conceção se pretende rotação em ambos os sentidos acaba-se por aglutinar todos os casos de forma aproximada.

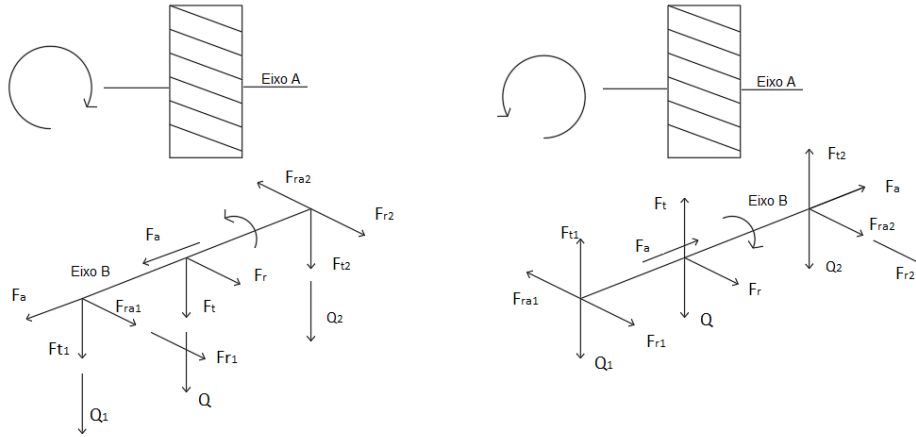
Após um estudo breve sobre os resultados de ambas as configurações, com recurso ao software, confirmou-se o expectável e escolheu-se um dentado com sentido de hélice à direita, que irá rodar nos dois sentidos.

No ANEXO B (Pág. 131), são documentadas as figuras com a representação dos esforços nos apoios da situação escolhida em ambos os sentidos de rotação, sendo também apresentadas as representações para a outra configuração de engrenagens, *Arquitetura Mista*.

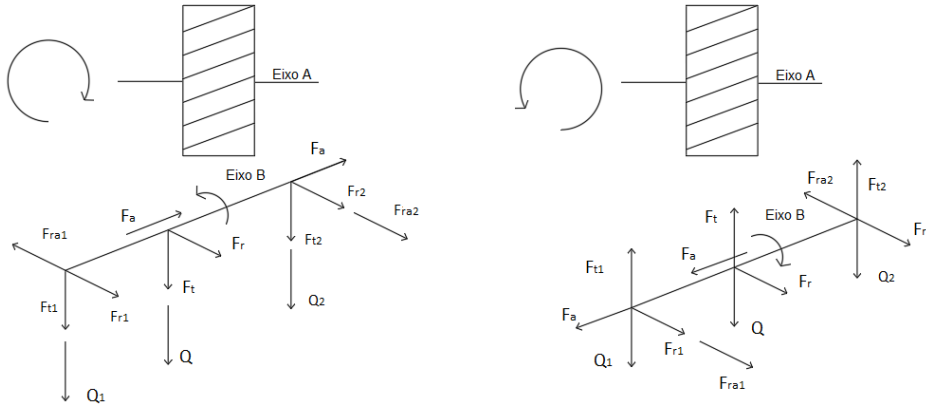
Os resultados dos esforços nos apoios para os dois sentidos de rotação apresentam variações máximas de 1 kN para os esforços radiais resultantes,  $F_R$  (esforço resultante dos esforços segundo x e z) e inversão do sentido do esforço axial, para os veios intermédios, tal como se pode constatar na Tabela 11. Nos veios A e D, também ocorre uma inversão do sentido do esforço axial, mantendo-se o esforço radial, visto que corresponde, unicamente, ao peso dos elementos

(os esforços tangenciais e radiais do pinhão z1 e da roda z6 equilibram-se).

Perante estes resultados compensa, efetivamente, dimensionar o redutor para apresentar os dois sentidos de rotação com a mesma capacidade de carga, visto que só é preciso identificar, para cada apoio, o esforço combinado mais elevado (entre os dois sentidos de rotação) e dimensionar o redutor, em função desses oito apoios majorados (Figura 10). Isto é, por exemplo, aplicar o mesmo rolamento nos apoios 3 e 5 (Rol 3 e Rol 5) (associado à situação do apoio 5 e rotação anti-horária) e o mesmo rolamento nos apoios 4 e 6 (Rol 4 e Rol 6) (associado à situação do apoio 4 e sentido de rotação horária). Para os veios de saída e entrada, o procedimento é semelhante.



(a) Representação dos esforços num veio genérico resultantes de um engrenamento de roda dentada direita, em ambos os sentidos de rotação.



(b) Representação dos esforços num veio genérico resultantes de um engrenamento de roda dentada esquerda, em ambos os sentidos de rotação.

Figura 11: Representação dos esforços atuantes nos apoios, para cada uma das quatro situações possíveis.

A *Arquitetura Mista* segue a mesma linha de pensamento aplicada na análise da *Arquitetura Simples*. Tem a particularidade de poder assumir um dentado direito-esquerdo, ou esquerdo-direito, no segundo andar, uma vez que ambos apresentam o mesmo sentido para as forças tangenciais,  $F_t$ , e radiais,  $F_r$ , no engrenamento, para qualquer sentido de rotação, e um esforço axial que se anula.

Tabela 11: Esforços nos apoios dos veios B e C da *Arquitetura Simples*, para ambos os sentidos de rotação [KISSsoft®].

|                     |            | Veio B  |         | Veio C  |         |
|---------------------|------------|---------|---------|---------|---------|
|                     |            | Apoio 3 | Apoio 4 | Apoio 5 | Apoio 6 |
| <b>Horário</b>      | $F_R$ [kN] | 16,625  | 67,424  | 15,925  | 66,352  |
|                     | $F_a$ [kN] | 0       | 17,159  | 0       | 17,159  |
| <b>Anti-Horário</b> | $F_R$ [kN] | 16,021  | 66,255  | 16,579  | 67,437  |
|                     | $F_a$ [kN] | 17,159  | 0       | 17,159  | 0       |

### 3.6 Dimensionamento dos veios e rolamentos

A análise das forças aplicadas nos engrenamentos e nos apoios dos veios permitiu identificar a melhor configuração a adotar, avaliar a capacidade de rotação em ambos os sentidos e pré-dimensionar os veios e os rolamentos.

Nesta secção, apresenta-se o dimensionamento dos veios e rolamentos, numa versão inicial, para as duas configurações em análise, *Arquitetura Simples* e *Arquitetura Mista*. O dimensionamento realizado considerou vários aspetos: a resistência à fadiga; a flecha dos veios; a capacidade de carga e o número de horas de funcionamento efetivas dos rolamentos.

Os parâmetros de comparação entre as soluções são: as dimensões de cada componente (rolamentos e veios); a massa de cada componente e do conjunto final; a potência dissipada por cada componente e pelo conjunto e ainda os diversos fatores de segurança dos componentes.

#### 3.6.1 Dimensionamento dos veios

Antes de iniciar a análise propriamente dita, dever-se-á fazer uma síntese das condições mínimas a que o sistema tem de obedecer.

Os esforços decorrentes de cada engrenamento provocam deslocamentos (flecha) nos veios que, caso assumam valores elevados comprometerão o correto engrenamento das rodas dentadas. Quando o veio sofrer flexão, ocorrerá um desalinhamento angular, responsável por um posicionamento diferente do engrenamento, que no caso de ser elevado provoca um funcionamento incorreto, aumentando a tendência para a ocorrência de fenómenos de desgaste. Assim, a flecha dos veios deve respeitar as seguintes restrições [24]:

- a flecha no engrenamento deve ser menor do que um centésimo do módulo,  $m_n$ , da engrenagem:  $\delta_g \leq 0,01 m_n$ ;
- a flecha máxima do veio deve ser menor do que um milésimo a três milésimos do comprimento,  $L$ , do veio:  $\delta_{max} \leq 0,001 L - 0,003 L$ ;
- a torção do veio deve ser:  $\Theta_T \leq 0,005 - 0,01 \text{ rad/m}$ ;

Quanto à resistência à fadiga dos veios, o fator de segurança deverá ser superior à unidade, sendo recomendado, pelo software, um coeficiente de segurança mínimo de 1,2. Este valor é indicado pela norma DIN 743, que é utilizada pelo software para realizar os cálculos.

Atendendo aos esforços nos apoios e respetiva orientação, representados nas figuras do Anexo B (Pág. 131), uma boa proposta de dimensionamento para a *Arquitetura Simples* seria aplicar rolamentos cónicos nos veios A e D (veios de entrada e saída, respetivamente) e rolamentos auto-compensadores de rolos nos veios B e C (veios intermédios). Para a *Arquitetura Mista* seriam empregues rolamentos cónicos no veio A, rolamentos auto-compensadores nos veios B e C e rolamentos de esferas no veio D, visto que a força axial não atua neste.

O processo de dimensionamento dos veios foi iterativo, e iniciou-se com valores obtidos pela Equação (3.1), expressão de G. Niemann, que permite obter um valor aproximado e indicativo da ordem de grandeza dos diâmetros dos veios.

$$d_v = 116,64 \sqrt[4]{\frac{P_A}{n}} \quad (3.1)$$

com:

- $d_v$  - diâmetro do veio [mm];
- $P_A$  - potência a transmitir [kW];
- $n$  - velocidade de rotação [rpm].

A Tabela 12 apresenta um resumo do dimensionamento dos veios: diâmetro, comprimento, massa e coeficiente de resistência dos veios, para cada uma das arquiteturas. O caso dos veios intermédios revela-se o mais desfavorável.

A Tabela 13 mostra os valores calculados e admissíveis para as deformações elásticas dos veios à flexão (flecha) e à torção, sendo ilustrados os valores para as situações mais críticas dos veios.

Tabela 12: Dimensionamento dos veios: diâmetros, comprimentos, massa e coeficientes de segurança à fadiga e estático [KISSsoft®].

| Veio           | <i>Arquitetura Simples</i> |         |       | <i>Arquitetura Mista</i> |         |       |
|----------------|----------------------------|---------|-------|--------------------------|---------|-------|
|                | Entrada                    | Interm. | Saída | Entrada                  | Interm. | Saída |
|                | A                          | B/C     | D     | A                        | B/C     | D     |
| $d_v$ [mm]     | 70                         | 120     | 140   | 70                       | 120     | 140   |
| $L$ [mm]       | 174,7                      | 435,8   | 227,1 | 174,7                    | 425,7   | 198,1 |
| Massa [kg]     | 5,3                        | 38,6    | 27,4  | 5,3                      | 37,7    | 23,9  |
| $S_{Fadiga}$   | 2,75                       | 7,97    | 4,65  | 5,36                     | 7,49    | 2,94  |
| $S_{Estatico}$ | 1,87                       | 9,19    | 3,93  | 4,48                     | 8,07    | 1,96  |



Tabela 13: Dimensionamento dos veios: deformações elásticas à flexão e torção [KISSsoft®].

| Veio                                      | <i>Arquitetura Simples</i> |         |        | <i>Arquitetura Mista</i> |         |        |        |       |
|---|----------------------------|---------|--------|--------------------------|---------|--------|--------|-------|
|   | Entrada                    | Interm. | Saída  | Entrada                  | Interm. | Saída  |        |       |
|   | A                          | B/C     | D      | A                        | B/C     | D      |        |       |
| $\delta_{m\acute{a}x}[\mu\text{m}]$       | 0,026                      | 67,128  | 0,182  | 0,03                     | 69,013  | 16,687 |        |       |
| $\delta_{adm} \text{ } [\mu\text{m}]$     | 524,1                      | 1373,4  | 681,3  | 524,1                    | 1277,1  | 594,3  |        |       |
| $\Theta_T \text{ } [^{\circ}]$            | 0,094                      | 0,059   | 0,126  | 0,090                    | 0,058   | 0,112  |        |       |
| $\Theta_{adm} \text{ } [^{\circ}]$        | 0,099                      | 0,261   | 0,129  | 0,099                    | 0,243   | 0,113  |        |       |
|   | Pinhão                     | Roda    | Pinhão | Roda                     | Pinhão  | Roda   | Pinhão | Roda  |
| $\delta_g[\mu\text{m}]$                   | 0,03                       | 50,95   | 63,02  | 16,4                     | 0,03    | 51,41  | 67,35  | 16,50 |
| $\delta_{g_{adm}} \text{ } [\mu\text{m}]$ | 50                         | 50      | 80     | 80                       | 50      | 50     | 70     | 70    |

### 3.6.2 Dimensionamento dos rolamentos

A Tabela 14 expõe os dados técnicos dos rolamentos utilizados em cada veio e para cada uma das arquiteturas, sendo indicado o rolamento mais solicitado. Por fim, nas Tabelas 15 e 16 indicam-se a massa e a potência dissipada por cada componente, bem como a as respectivas somas para cada uma das arquiteturas analisadas. Os cálculos foram efetuados considerando o mesmo rolamento para todos os apoios dos veios B e C (veios intermédios).

Tabela 14: Caraterísticas técnicas dos rolamentos aplicados nos vários veios, para cada uma das arquiteturas [KISSsoft®].

| Arquitetura    | Veio       | Rolamento                 | $L_{nh}$ [h] | $S_0$ | Perda<br>Total [W] |
|----------------|------------|---------------------------|--------------|-------|--------------------|
| <i>Simples</i> | Entrada/A  | FAG 33114 - 70x120x37     | 24 360       | 24    | 300                |
|                | Interm. /B | SKF 22224 EK - 120x215x58 | 29 023       | 7     | 113                |
|                | Interm. /C | SKF 22224 EK - 120x215x58 | 28 275       | 7     | 111                |
|                | Saída/D    | FAG 32028X - 140x210x45   | 139 925      | 17    | 62                 |
| <i>Mista</i>   | Entrada/A  | FAG 33114 - 70x120x37     | 244 441      | 48    | 300                |
|                | Interm. /B | FAG 23024 XL - 120x180x46 | 20 837       | 7,4   | 128                |
|                | Interm. /C | FAG 23024 XL - 120x180x46 | 32 923       | 8,4   | 121                |
|                | Saída/D    | FAG 16028 - 140x200x22    | >1000 000    | 52    | 3                  |

Tabela 15: Valores da massa de cada elemento e respetiva soma, para cada uma das Arquiteturas analisadas [KISSsoft®].

| Massa [kg]   | <i>Arquitetura Simples</i> | <i>Arquitetura Mista</i> |
|--------------|----------------------------|--------------------------|
| Engrenagens  | 718                        | 717                      |
| Veios        | 110                        | 104,5                    |
| Rolamentos   | 50,6                       | 25,2                     |
| <b>Total</b> | <b>879</b>                 | <b>847</b>               |

Tabela 16: Valores de potência dissipada por cada elemento e respetiva soma, para cada uma das Arquiteturas analisadas [KISSsoft®].

| Perdas [kW]               | <i>Arquitetura Simples</i> | <i>Arquitetura Mista</i> |
|---------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Engrenagens ( $P_{VZP}$ ) | 4,482                      | 4,474                    |
| Rolamentos ( $P_{VL}$ )   | 0,5858                     | 0,5558                   |
| <b>Total</b>              | <b>5,068</b>               | <b>5,032</b>             |

Com os dados apresentados, a *Arquitetura Mista* possui um atravancamento menor, uma massa mais reduzida e rolamentos mais atrativos. Estes três parâmetros são os que apresentam maior peso na diferenciação das arquiteturas. Verifica-se, também, uma pequena redução na potência dissipada e maiores coeficientes de segurança à fadiga na *Arquitetura Mista* (configuração com dentado helicoidal simples e duplo, Figura 8b).

## 4 Otimização das Engrenagens

Após a realização do estudo da melhor configuração das engrenagens, é necessário otimizar a arquitetura escolhida (*Arquitetura Mista*).

Neste capítulo descreve-se um estudo dos fatores que contribuem para melhorar as condições de funcionamento do redutor e as características das engrenagens.

Os melhoramentos, essencialmente na resistência e rendimento, resultam da lubrificação, da alteração do dentado, do acabamento de superfície e da redução da massa.

### 4.1 Lubrificação

A lubrificação dos componentes é um parâmetro primordial. Esta é responsável pela redução do desgaste e do número de avarias, pela evacuação de calor do contacto, etc.

Para os cálculos iniciais, foi considerado um óleo mineral ISO VG 220, que assume a designação de lubrificante inicial. No entanto, pretende-se identificar a influência da base do lubrificante e das suas propriedades, essencialmente da viscosidade, nos parâmetros em análise.

Óleos parafínicos de base mineral para engrenagens apresentam, geralmente, índices de viscosidade (VI) inferiores à maioria dos óleos de base sintética para engrenagens. Deste modo, estes vão apresentar, a baixas temperaturas, piores propriedades do que um sintético comparável. A altas temperaturas os óleos minerais são mais propensos à oxidação devido, em parte, à quantidade de compostos polares e insaturados residuais no componente de base. Geralmente, apresentam uma viscosidade mais alta sob pressão e um filme de lubrificante mais espesso a temperaturas moderadas, bem como a vantagem de um menor custo e uma maior disponibilidade.

Os lubrificantes sintéticos podem melhorar a eficiência do sistema e estar sujeitos a temperaturas mais baixas, devido à sua reduzida variação da viscosidade com a temperatura e propriedades de transferência de calor (influenciadas pela estrutura). O funcionamento a mais baixas temperaturas conduz a um aumento da vida útil da engrenagem e do rolamento, devido ao aumento da espessura do filme lubrificante, e a um aumento da vida útil do lubrificante (reduzindo a oxidação).

Sabe-se que a redução de viscosidade apresenta diferentes contributos para os vários tópicos em análise, destacando-se a redução de perdas de potência nos engrenamentos, que conduz a um aumento do rendimento e a uma diminuição do calor gerado e, em oposição, a uma redução da espessura específica de lubrificante [25, 26].

O estudo realizado para a seleção do lubrificante que conduz à otimização da concepção centrou-se na análise de óleos sintéticos com viscosidade cinemática de 150 cSt a 40 ° (inferior à do óleo mineral escolhido inicialmente). Foram testados vários óleos, adequados para esta aplicação, escolhendo-se os três melhores, cujas respetivas propriedades estão indicadas na Tabela 17 e os parâmetros em estudo na Tabela 18.

Os óleos indicados apresentam uma base poliglicol e um fator do lubrificante, XL, de 0,585. Estes lubrificantes têm uma estrutura química diferente dos óleos de base PAO (Poli-Alfa-Olefinas) e éster, apresentando uma excelente estabilidade térmica e oxidativa, e a maioria possui um VI ,excecionalmente, alto, muitos dos quais são maiores que 200. No entanto, muitos deles

têm propriedades de corrosão pobres na presença de água salgada [25].

Tabela 17: Propriedades dos lubrificantes escolhidos [KISSsoft®].

| Propriedades                                    | Inicial<br>(ISO VG 220) | Castrol Optigear<br>Synthetic 150 | Mobilgears<br>600 XP 150 | Klubersynth<br>EG4 150 |
|---|-------------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------|
| $\rho_{15^\circ \text{C}}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | 895                     | 847                               | 890                      | 870                    |
| $\nu_{40}$ [mm <sup>2</sup> /s]                 | 220                     | 146                               | 150                      | 150                    |
| $\nu_{100}$ [mm <sup>2</sup> /s]                | 17,50                   | 19                                | 14,7                     | 18                     |
| $\theta_{min.}$ [°C]                            | -15                     | -30                               | -25                      | -35                    |
| $\theta_{máx.}$ [°C]                            | 120                     | 95                                | 120                      | 140                    |
| Teste <i>micropitting</i>                       | 10                      | 10                                | 10                       | 10                     |
| Teste <i>gripagem</i>                           | 12                      | 14                                | 12                       | 14                     |

Tabela 18: Coeficientes de segurança e dados energéticos, para cada lubrificante na *Arquitetura Mista* [KISSsoft®].

|                 | Inicial<br>(ISO VG 220) |        | Castrol Optigear<br>Synthetic 150 |        | Kublersynth<br>EG4 150 |        | Mobilgears<br>600 XP 150 |        |
|-----------------|-------------------------|--------|-----------------------------------|--------|------------------------|--------|--------------------------|--------|
| Andar           | 1                       | 2      | 1                                 | 2      | 1                      | 2      | 1                        | 2      |
| $S_B$           | 8,72                    | 3,98   | 11,75                             | 5,28   | 10,50                  | 5,46   | 7,32                     | 3,80   |
| $S_{Sint}$      | 4,44                    | 3,61   | 5,82                              | 5,69   | 5,10                   | 4,71   | 3,84                     | 3,55   |
| $S_{micro}$     | 4,15                    | 1,16   | 5,44                              | 1,54   | 3,39                   | 1,34   | 5,11                     | 1,92   |
| $\mu$           | 0,047                   | 0,063  | 0,038                             | 0,052  | 0,034                  | 0,044  | 0,048                    | 0,063  |
| $\lambda_{min}$ | 0,820                   | 0,232  | 0,591                             | 0,107  | 0,505                  | 0,200  | 0,504                    | 0,189  |
| $P_{VZP}$ [kW]  | 0,820                   | 1,417  | 0,664                             | 1,167  | 0,592                  | 1,003  | 0,850                    | 1,438  |
| Rend. [%]       | 99,562                  | 99,244 | 99,646                            | 99,378 | 99,685                 | 99,463 | 99,547                   | 99,233 |

O óleo escolhido foi o Kublersynth EG 4-150, uma vez que é o lubrificante que apresenta o melhor compromisso entre os parâmetros em análise. A escolha foi mais focada na componente energética, visto que todas as soluções apresentam valores de coeficientes de segurança consideráveis. Este lubrificante é o que garante a menor perda de potência, o que apresenta a maior gama de temperaturas de funcionamento e uma das melhores viscosidades cinemáticas a 100 °C.

#### 4.1.1 Tipo de lubrificação

Para identificar algumas particularidades que o sistema de lubrificação possa impor, é necessário, primeiramente, conhecer o seu tipo de lubrificação. O tipo de lubrificação também

vai condicionar as perdas de potência verificadas no redutor.

Segundo Henriot [27], o tipo de lubrificação é identificado a partir do diâmetro primitivo de funcionamento e da velocidade de rotação, isto é, da velocidade tangencial no primitivo de funcionamento, de cada roda dentada mergulhada no lubrificante. Esta identificação pode ser realizada na através da representação gráfica da Figura 12.

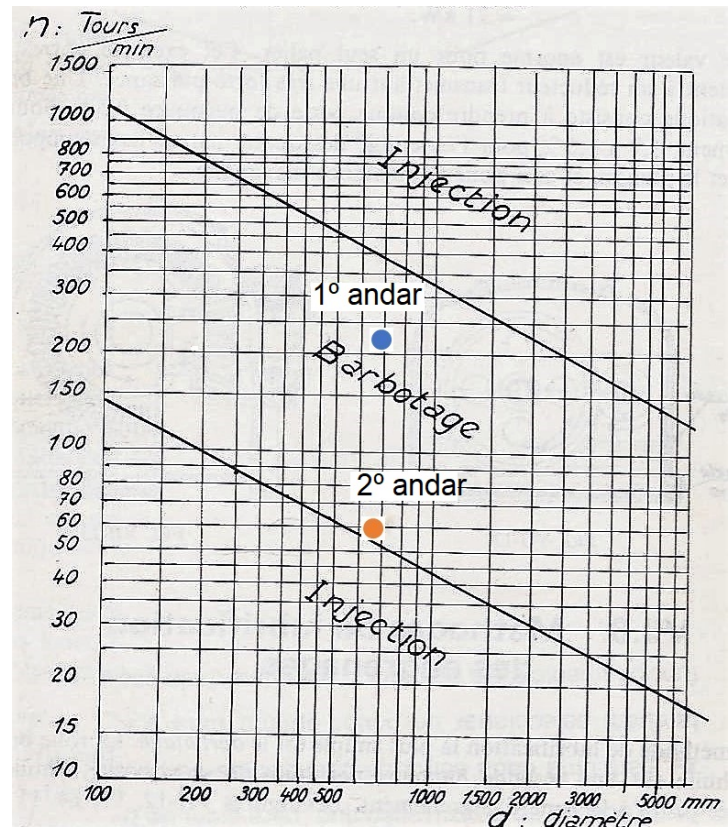


Figura 12: Representação gráfica do tipo de lubrificação de cada andar em função da sua velocidade de rotação e do diâmetro primitivo de funcionamento [27].

Os resultados obtidos remetem para a chapinagem, tal como é indicado evidenciado no gráfico da Figura 12 e indicado na Tabela 19, juntamente com os respectivos dados utilizados na sua identificação.

Tabela 19: Tipo de lubrificação nas roda dentada mergulhadas no lubrificante e respectivos dados para a sua obtenção [27].

| Roda dentada | $d_w$ [mm] | $n$ [rpm] | Lubrificação |
|--------------|------------|-----------|--------------|
| z2/z4        | 691,626    | 225,5369  | Chapinagem   |
| z6           | 669,069    | 60,5232   | Chapinagem   |

Para este tipo de lubrificação, é necessário determinar o nível de óleo nas rodas dentadas e a quantidade total de lubrificante. Estes parâmetros terão influência na qualidade de lubrificação de cada engrenamento e nas potências dissipadas.

O nível de óleo recomendado é o que abrange aproximadamente três vezes a altura do dente da roda mergulhada [27]. Como a roda z6 é a roda mergulhada com menor diâmetro e apresenta

uma altura de dentado de 15,68 mm, o nível de óleo será de 50 mm nesta e de 60 mm nas rodas z2 e z4.

O nível de óleo relativamente ao fundo do cárter, será de 75 mm, uma vez que a folga arbitrada entre este e as rodas z2 e z4 é de 15 mm. Desta forma, a quantidade de óleo necessária é de 35 litros.

Este valor, além de ser mínimo, é o suficiente para esta aplicação, já que a pior situação (lubrificação do pinhão z1) é contornada com a dupla alimentação, por parte das duas rodas intermédias (z2 e z4). No caso do engrenamento de saída, a roda apresenta uma velocidade reduzida, pelo que não existirá projeção de lubrificante. Este valor ao ser mínimo permite apresentar menores perdas por chapinagem.

## 4.2 Modificação do dentado

A modificação pode ser realizada no flanco e no pé do dente, e consiste na remoção de material da evolvente, nestes locais. As modificações deverão ser realizadas de forma adequada, para evitar o aumento da tensão no flanco do dente, que está diretamente ligado ao aumento do risco de iniciação de “*pitting*”. A magnitude necessária da modificação do perfil depende da magnitude da deformação elástica do dente que precisa ser compensada [28].

Estas modificações conduzem a um melhor engrenamento dos pares de dentes, bem como a uma diminuição de erros de transmissão. O cálculo da capacidade de carga das engrenagens baseia-se na suposição de que os dentes da engrenagem são absolutamente rígidos e que o perfil do dente da engrenagem é ideal e preciso. No entanto, os dentes de engrenagens reais sofrem deflexão sob carga, pelo que a modificação do perfil é implementada para compensar as deflexões dos flancos dos dentes esperadas sob carga. Isto dá origem a erros de transmissão reduzidos.

Uma modificação do perfil, na área do flanco e na do pé, permite reduzir ou eliminar os choques de contacto, particularmente em engrenagens altamente carregadas, durante as transições de contacto duplo, para contacto único dos dentes das rodas dentadas e vice-versa.

A modificação de perfil pode reduzir a influência da tensão do dente nas flutuações de rigidez ao longo da malha e, portanto, limitar o número de erros de transmissão, bem como diminuir os níveis de vibração e ruído [20, 28].

Esta alteração pode ser executada através de diferentes configurações. No entanto, apenas modificações lineares e parabólicas do perfil são amplamente aplicadas. Modificações lineares de perfil resultam num pequeno erro de transmissão para uma carga constante. Por outro lado, a modificação parabólica do perfil resulta numa curva suave do flanco do dente, adequada para cargas variáveis, mas podendo dar origem a um aumento do erro de transmissão.

Neste redutor foi implementado um “*Tip and Root Relief*” linear, Figura 13a, já que se consegue elaborar com a ferramenta de talhagem, ao contrário do perfil parabólico, que precisa de uma retificadora [20, 28].

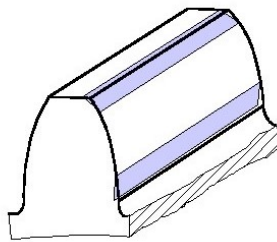
O valor da correção de perfil,  $C_a$ , deverá estar compreendido entre  $0,333 C_{eff}$  e  $2,5 C_{eff}$ , sendo  $C_{eff}$  o valor ótimo da correção calculado pelo software. A modificação do perfil,  $C_a$ , deve compensar a deformação do dente, de modo a que o contacto deste, ao longo da sua altura, não seja comprometido.

Esta modificação de perfil reduz a força normal no início e no final do contacto do dente. O deslizamento é maior no início e no final do contacto, portanto, reduzindo a tensão de contacto nessa área, pode reduzir o risco de arranhões [20].

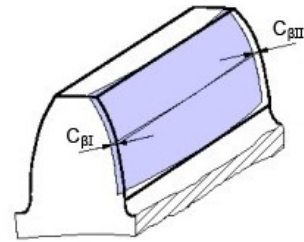
Uma outra modificação, conhecida como “*Crowning*”, Figura 13b, pode ser realizada na extensão do flanco. Consiste na remoção crescente de material, na direção das superfícies, das faces do dente. Esta remoção pode ser realizada de diferentes formas, destacando-se a remoção em arco. Tal modificação, permite reduzir a sensibilidade da engrenagem a erros no alinhamento do eixo ou à distância do centro [20].

Neste projeto, relativamente ao “*Crowning*”, foi aplicado, uma correção em arco e bilateral, de forma a poder realizar-se o ajuste, qualquer que seja o sentido de rotação de sistema, em detrimento de um arco unilateral aconselhável para um sentido de rotação fixa.

Nas Tabelas 20 e 21, são apresentados os valores das modificações praticadas nas rodas dentadas e dos coeficientes de segurança obtidos, respetivamente. O estado *Sem Modificação* apresenta os valores obtidos com o lubrificante selecionado e o *Com Modificação* é inerente à aplicação da modificação de dentado na presença do lubrificante selecionado.



(a) Modificação por “*Linear Tip and Root Relief*” [20].



(b) Modificação por “*Crowning*” [20].

Figura 13: Representação da modificação realizada nos dentes de cada roda dentada [20].

Tabela 20: Modificação no flanco e pé do dente e modificação na extensão do flanco [*KISSsoft*®].

|  | Andar 1 | Andar 2 |
|--|---------|---------|
| “ <i>Tip Relief</i> ”, $Ca_a$ [ $\mu\text{m}$ ]  | 28      | 70      |
| “ <i>Root Relief</i> ”, $Ca_a$ [ $\mu\text{m}$ ] | 9       | 50      |
| “ <i>Crowning</i> ”, $Cb$ [ $\mu\text{m}$ ]      | 10      | 10      |

Tabela 21: Coeficientes de segurança sem e com modificação do perfil do dente [KISSsoft®].

|                 | Sem Modificação |           | Com Modificação |           |
|-----------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
| Andar           | 1               | 2         | 1               | 2         |
| $S_F$           | 2,62/2,06       | 1,96/1,57 | 2,77/2,17       | 1,97/1,57 |
| $S_H$           | 1,83/1,49       | 1,34/1,09 | 1,83/1,49       | 1,31/1,07 |
| $S_B$           | 10,50           | 5,46      | 11,46           | 5,50      |
| $S_{Sint}$      | 5,095           | 4,7       | 6,4             | 5,50      |
| $S_{micro}$     | 3,389           | 1,339     | 5,15            | 1,63      |
| $\mu$           | 0,505           | 0,2       | 0,027           | 0,037     |
| $\lambda_{min}$ | 0,808           | 0,233     | 0,84            | 0,27      |
| $P_{VZP}$ [kW]  | 0,592           | 1,003     | 0,485           | 0,838     |
| Rend. [%]       | 99,685          | 99,463    | 99,741          | 99,553    |

### 4.3 Redução de massa

Quando as dimensões das rodas dentadas são elevadas, executa-se, geralmente, uma redução de massa. Esta pode ser obtida de diversos modos, tais como: remoção de material por maquinagem; fundição da estrutura projetada para a roda; elaboração por construção soldada; etc., garantindo sempre os requisitos estruturais mínimos e a menor massa possível.

A redução de massa, além de induzir a uma redução de peso, facilitando a montagem e utilizar menor quantidade de material, tem, como principal vantagem, a redução dos esforços nos apoios. Isto leva à aplicação de rolamentos menores e a melhores coeficientes de segurança, proporcionando, de um modo geral, uma redução das perdas de potência. A capacidade de carga e resistência é definida pela arquitetura da engrenagem e não pela quantidade de material.

A redução de massa será implementada nas rodas z2, z4 e z6 (Figuras 8b e 10), atendendo ao elevado diâmetro e à largura razoável destas. Esta redução de material foi obtida pelo fabrico das engrenagens por fundição, tendo-se selecionado um material compatível com este processo. Posteriormente, as rodas necessitam de acabamentos e da talhagem dos dentes.

As dimensões das várias partes que constituem a roda dentada foram obtidas segundo indicações apresentadas na literatura, verificando-se uma diversidade de soluções. Em síntese, apresentam-se as várias indicações recolhidas para essas dimensões (ver Figura 14).

A nível do cubo da roda, verifica-se que:

- segundo Soto [29], o tradicional será apresentar uma espessura,  $c$ , de 0,45 a 0,5 do diâmetro do veio,  $d_v$  e, em casos de elevado diâmetro da roda, a espessura ser 0,375 do diâmetro do veio;
- segundo Radzevich [6], para situações de elevada potência a espessura,  $c$ , deve ser 3 a 4



vezes a altura total do entalhe (escatel de uma chaveta, estriado, etc.);

- segundo Reshetov [30], para rodas com diâmetro idêntico ao verificado nas rodas desta conceção, a espessura deve ser 0,275 do diâmetro do veio.

No caso da jante da roda:

- segundo Soto [29], a espessura,  $k$ , deverá ser 0,45 do passo circular da roda,  $p_t$ ;
- segundo Radzevich [6], para situações de elevada potência, a espessura deve ser de 3 a 4 vezes a altura total do dente;
- segundo Reshetov [30], a espessura deverá ser em função da altura dos dentes, numa ordem de 4 vezes e nunca seja inferior a 16 mm.

Quanto à alma da roda:

- segundo Soto [29], deverá apresentar uma espessura de 1,9 do módulo,  $m_n$  ou 0,2 - 0,3 da largura da roda,  $b$ ;
- segundo Radzevich [6], para situações de elevada potência, a espessura será de 1 a 2 vezes a altura total do dente,  $h$ ;
- segundo Reshetov [30], a espessura assume um valor de 0,8 da espessura da jante,  $k$ .

Realizando uma conjugação dos valores apresentados para cada uma das partes e considerando que também serão implementadas nervuras (reforços radiais) nas rodas, considerou-se: a espessura no cubo da roda igual a 4 vezes a altura do escatel da chaveta na roda ou da altura do dente do estriado; a espessura da jante igual a 4 vezes a altura do dentes; a espessura da alma igual a 0,25 da largura da roda; a espessura das nervuras igual a 0,8 da espessura da alma; um número ímpar de nervuras.

Na conceção da estrutura das rodas, aplicaram-se, em todas as arestas vivas, raios de concordância e nas superfícies, saídas para garantir uma desmoldação sem danos (visto serem necessários tais cuidados em fundição). Implementaram-se, também, nervuras que atingem as faces laterais das rodas, quando a largura do cubo é superior à largura da roda e embutidas, quando o cubo é igual ou menor que a largura da roda. Tais configurações foram implementadas, de modo a assegurar sempre a existência de uma zona para fixação e centragem da roda no processo de maquinagem.

Na Tabela 22, são apresentadas as dimensões das várias partes da roda e outras dimensões características, enquanto na Tabela 23 se indicam os diâmetros das várias partes. Na Figura 14, está esquematizada a configuração genérica de uma roda dentada com reforços, juntamente com as respetivas dimensões.

A avaliação da integridade estrutural de cada roda foi realizada por intermédio do cálculo do coeficiente de segurança ao corte no diâmetro do cubo,  $d_c$ , local de maior força de corte, devido ao reduzido diâmetro e menor secção transversal.

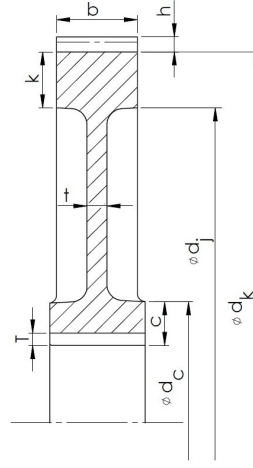


Figura 14: Representação genérica da configuração de uma roda com reforços [6, 29, 30].

Tabela 22: Espessuras das partes constituintes das rodas z2, z4 e z6 [6, 29, 30].

| Roda  | $b$ [mm] | $h$ [mm] | $T$ [mm] | $c$ [mm] | $k$ [mm] | $t$ [mm] | $t_{aba}$ [mm] |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------|
| z2/z4 | 60,7     | 11,21    | 7,4      | 30       | 44,85    | 15       | 24             |
| z6    | 119,1    | 15,68    | 9        | 36       | 62,72    | 30       | 12             |

Tabela 23: Diâmetros das partes constituintes das rodas z2, z4 e z6, e repetitiva massa [6, 29, 30].

| Roda  | $d_v$ [mm] | $d_c$ [mm] | $d_j$ [mm] | $d_k$ [mm] | $n_{aba}$ [mm] | Massa [kg] |
|-------|------------|------------|------------|------------|----------------|------------|
| z2/z4 | 121        | 180        | 610        | 699,59     | 5              | 87,3       |
| z6    | 170/180    | 250        | 550        | 679,78     | 7              | 184,4      |

A Expressão (4.1) indica o valor da tensão de corte equivalente,  $\tau_{eq}$ , em função do momento torsor,  $M_t$  e das características da secção em análise (espessura,  $t$ , e raio,  $r$ , da zona em análise) e a Expressão (4.2) indica o valor do coeficiente de segurança,  $C.S.$ , em função da tensão de corte admissível,  $\tau_{adm}$ , e da tensão de corte equivalente,  $\tau_{eq}$ . Os valores obtidos foram registados na Tabela 24.

$$\tau_{eq} = \frac{F}{A} = \frac{\frac{M_t}{r}}{2\pi r t} = \frac{M_t}{2\pi r^2 t} \quad (4.1)$$

$$C.S. = \frac{\tau_{adm}}{\tau_{eq}} \quad (4.2)$$

Um parâmetro determinante no cálculo do valor da massa é a largura das engrenagens. A largura da rodas z2 e z4 não foi alterada, visto ser de dentado helicoidal simples. No entanto, a largura da roda z6 aumentou relativamente ao inicialmente considerado, para garantir a realização do dentado helicoidal duplo. A determinação da largura da ranhura foi obtida em função do

processo escolhido para a geração de dentado, neste caso, por buril pinhão (“*outil pignon*”), com um valor de ranhura de 15 mm. Existem outros processos de talhagem, desde os que necessitam de maior largura da ranhura (por exemplo a fresa-mãe) até aos que conseguem talhar sem a necessidade de ranhura (por exemplo fresas de bico) [22].

Tabela 24: Valores das variáveis de cálculo da resistência no diâmetro do cubo das rodas,  $d_c$ .

| Roda  | $M_t$ [kN·m] | $r$ [mm] | $t$ [mm] | $\tau_{adm}$ [MPa] | $\tau_{eq}$ [MPa] | C.S.  |
|-------|--------------|----------|----------|--------------------|-------------------|-------|
| z2/z4 | 7,94         | 90       | 15       | 404                | 10,40             | 38,80 |
| z6    | 59,36        | 125      | 30       | 404                | 20,15             | 20    |

#### 4.4 Análise energética

##### 4.4.1 Semiproduto

Com uma pré-estruturação do redutor, conseguiu-se identificar todos os componentes necessários, nomeadamente os que contribuem para as perdas de potência.

Deste modo, com o conhecimento do nível de óleo e dos vedantes, facilmente se calculam as perdas por chapinagem e nos vedantes, permitindo, assim, obter-se o valor das perdas totais no redutor.

Numa primeira análise sobre o redutor pré-estruturado, o valor total das perdas é importante na comparação com o valor da capacidade de dissipação de calor por parte do cárter, com o intuito de identificar as alterações a realizar, para aumentar a sua capacidade.

O cálculo da perda de potência, por chapinagem, nas engrenagens, bem como o das perdas nos vedantes, foi elaborado com base nas equações do relatório técnico ISO/TR 14179-2 [31]. A perda de potência nos rolamentos e nas engrenagens (perda dependente da carga) são obtidas pelo software *KISSsys*®.

De forma sucinta, apresenta-se o processo de cálculo das perdas nos vários componentes do redutor, anexando-se uma pequena explicação [31, 32].

Começando pelo cálculo da perda de potência total,  $P_T$ , esta é composta pelas perdas nas engrenagens  $P_{VZ}$ , nos vedantes  $P_{VD}$ , nos rolamentos  $P_{VL}$  e outras perdas  $P_{VX}$  (que neste caso não existem). Cada uma das perdas ramifica-se noutras mais específicas, tal como será demonstrado.

- Perda de potência total:

$$P_T = P_{VZ} + P_{VL} + P_{VD} + P_{VX} \quad (4.3)$$

- Perda de potência nas engrenagens:

$$P_{VZ} = P_{VZ0} + P_{VZP} \quad (4.4)$$

A perda de potência numa engrenagem subdivide-se em: perda de potência independente da carga,  $P_{VZ0}$ , e perda de potência dependente da carga,  $P_{VZP}$ .

A perda  $P_{VZ0}$  corresponde à potência perdida na lubrificação por chapinagem, sendo calculada através da velocidade angular  $\omega$  e binário hidráulico  $T_H$ :

$$P_{VZ0} = \sum_{i=1}^n T_{Hi} \frac{\pi n_i}{30} \quad (4.5)$$

O binário de perda hidráulica de cada roda dentada é determinado por:

$$T_H = C_{Sp} C_1 e^{C_2} \left( \frac{v_t}{v_{t0}} \right) \quad (4.6)$$

onde  $C_{Sp}$  depende da altura de imersão  $e$ ;  $C_1$  e  $C_2$  dependem da largura da face  $b$  e da altura de imersão  $e$  (ver Figura 15):

$$\begin{aligned} C_1 &= 0,063 \left( \frac{e_1 + e_2}{e_0} \right) + 0,0128 \left( \frac{b}{b_0} \right)^3 \\ C_2 &= \frac{e_1 + e_2}{80 e_0} + 0,2 \\ C_{Sp} &= \left( \frac{2 r_{a2}}{l_H} \right) \left( \frac{4 e_2}{3 r_{a2}} \right)^{1,5} \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$l_H = \frac{4 A_G}{U_M}$$

$$U_M = 2 (L + H)$$

$$A_G = L H$$

A perda  $P_{VZP}$  corresponde à potência perdida no contacto das rodas dentadas, que depende da potência transmitida, do valor do coeficiente de atrito medido no contacto das rodas dentadas e do fator de perdas das engrenagens,  $H_v$ , o qual é determinado só a partir da geometria da engrenagem.

$$P_{VZP} = P_A \mu_{mz} H_v \quad (4.8)$$

com o fator de perdas da engrenagem para pares de rodas cilíndricas:

$$H_v = \frac{\pi (u + 1)}{Z_1 u \cos(\beta_b)} (1 - \varepsilon_\alpha + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2) \quad (4.9)$$

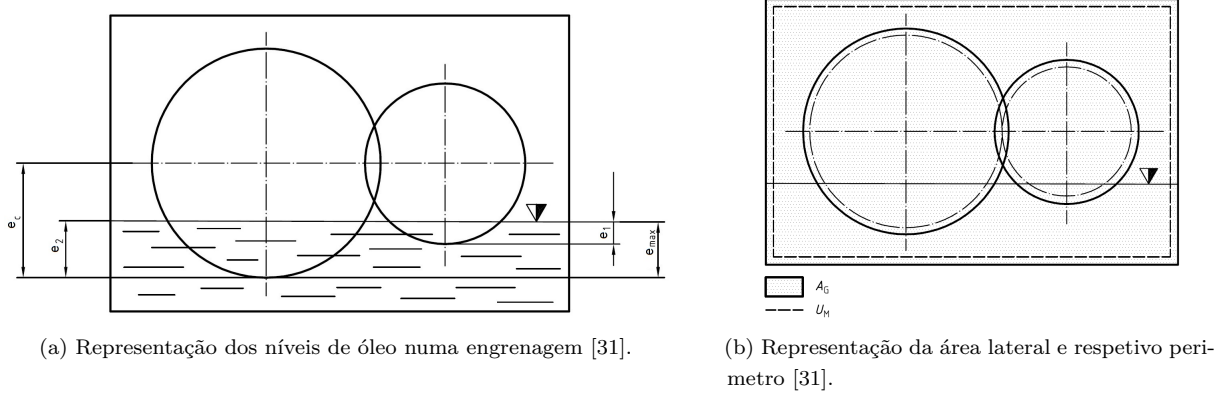


Figura 15: Esquemas das variáveis para cálculo das perdas de potência por chapinagem [31].

- Perda de potência nos vedantes:

$$P_{VD} = 7,69 \times 10^{-6} d_{sh}^2 n \quad (4.10)$$

As perdas de potência nos vedantes em muitos casos são menores que 0,01 % da potência nominal transmitida e são desprezáveis comparativamente às outras perdas do redutor.

- Perda de potência nos rolamentos:

$$P_{VL} = T_{VL} \omega = T_{VL} \frac{\pi n}{30} \quad (4.11)$$

com:

$$T_{VL} = T_{VL0} + T_{VLP1} + T_{VLP2} \quad (4.12)$$

Os métodos de cálculo são frequentemente deduzidos das equações de Eschmann, com a parcela independente da carga  $T_{VL0}$  e o binário de perda dependente da carga  $T_{VLP1}$ . Para rolamentos axiais de rolos e agulhas, deve estabelecer-se um binário de perda  $T_{VLP2}$  adicional.

Segundo o método de avaliação da SKF, é proposto que a parcela independente da carga para situações de  $\nu_{oil} \cdot n < 2000 \text{ mm}^2/\text{s} \cdot \text{min}$ , seja igual a:

$$T_{VL0} = 1,6 \times 10^{-8} f_0 d_m^3 \quad (4.13)$$

para  $\nu_{oil} n \geq 2000 \text{ mm}^2/\text{s} \cdot \text{min}$ :

$$T_{VL0} = 10^{-8} f_0 (\nu_{oil} n)^{2/3} d_m^3 \quad (4.14)$$

com  $f_0$  em função do tipo de rolamento e da lubrificação.

As perdas dependentes da carga são calculadas por:

$$T_{VLP1} = 10^{-3} f_1 P_1 d_m \quad (4.15)$$

onde  $f_1$  é novamente função do tipo de rolamento e  $P_1$  é a carga equivalente do rolamento e:

$$T_{VLP2} = 10^{-3} f_2 F_a d_m \quad (4.16)$$

onde  $f_2$  pode ser aproximado a 0,006.

Para muito rolamentos anti-fricção, a perda de potência está no patamar dos 0,1 % da potência transmitida. Para rolamentos cónicos, a perda de potência é frequentemente muito maior, podendo variar, substancialmente, com a aplicação de uma pré-carga e da classe do rolamento.

Na Tabela 25, são apresentadas as perdas totais de cada tipo de componente abordado para a situação de plena carga no redutor, sendo o valor da perda nos rolamentos relativo à situação mais gravosa de rotação.

Tabela 25: Perdas de potência em vários componentes do redutor, numa fase intermédia de concepção.

| $P_{VZP}$ [W] | $P_{VZ0}$ [W] | $P_{VL}$ [W] | $P_{VD}$ [W] | Total [W] |
|---------------|---------------|--------------|--------------|-----------|
| 2644          | 26            | 445          | 56           | 3171      |

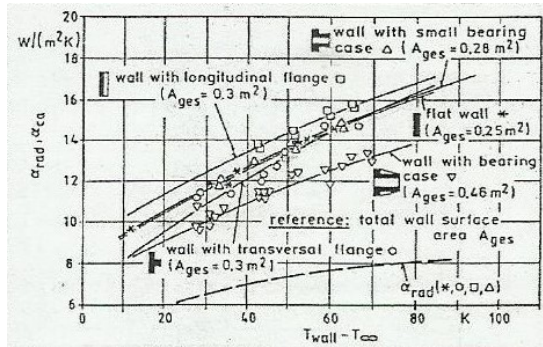
O cálculo da capacidade dissipativa do cárter foi realizado recorrendo à combinação das duas principais formas de dissipação de calor, convecção e radiação.

A Equação (4.17) representa o cálculo da capacidade de dissipação por parte do cárter. Os gráficos da Figura 16 ilustram as várias condições em que ocorre a dissipação de energia para o exterior, juntamente com o respetivo valor do coeficiente de dissipação combinado,  $\alpha_{ca}$  [32]. A explicação detalhada do cálculo de cada parcela de dissipação individual de energia, bem como toda a nomenclatura associada, pode ser consultada no relatório técnico ISO/TR 14179-2:2001. Neste é exposta, também, a descrição do cálculo da dissipação de energia por outros componentes do redutor (por exemplo os veios).

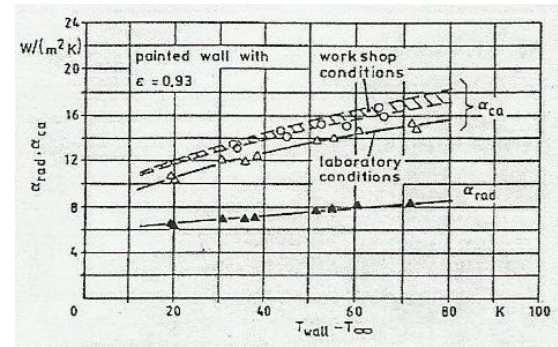
$$Q_{ca} = \alpha_{ca} A_{ca} (v_{oil} - v_{air}) \quad (4.17)$$

Para efetuar os cálculos, foi considerada uma temperatura da parede do cárter,  $v_{oil}$ , igual à considerada para o lubrificante no dimensionamento das configurações concebidas, 60 °C, e uma temperatura ambiente,  $v_{air}$ , de 30 °C.

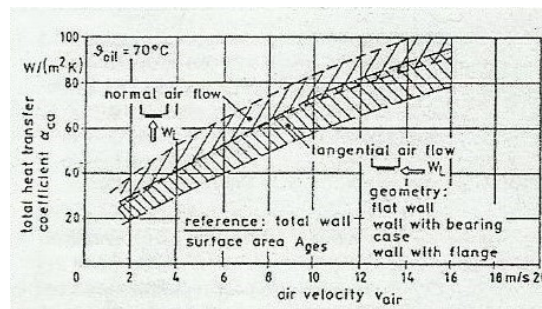
A capacidade de dissipação de energia pelo cárter vai depender da área exposta e do valor de  $\alpha_{ca}$ , o qual resulta das condições consideradas para o redutor. Com o cárter, sem qualquer modificação (ausência de alhetas), foram testadas várias situações possíveis, com  $\alpha_{ca}$  diferentes. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 26.



(a) Coeficiente de transferência de calor para convecção natural.



(b) Coeficiente de transferência de calor do cárter para diferentes condições ambientais.



(c) Coeficiente de transferência de calor do cárter para convecção forçada.

Figura 16: Representação gráfica da evolução do coeficiente de transferência de calor do cárter em diferentes situações e condições [32].

As várias condições de teste são listadas, de seguida:

- condição 1: regime natural;

Esta condição é muito drástica visto que ocorrerá sempre um contributo de convecção forçada. No gráfico da Figura 16a, relativamente à situação de parede com rolamento, ou na Figura 16b atribuem-se valores entre 10-12 ao coeficiente de transferência de calor.

- condição 2: regime forçado com incidência intermédia, velocidade de 2 m/s e ambiente de trabalho, Figura 16c;
- condição 3: regime forçado com incidência intermédia, velocidade de 3 m/s e ambiente de trabalho, Figura 16c;

Por fim, foi testada, perante a condição 3, a implementação de alhetas a fim de melhorar os resultados e perceber o contributo destas, sendo, também, apresentados na Tabela 26, os valores obtidos.

As alhetas contribuem, substancialmente, para o aumento da capacidade de dissipação de energia por parte do sistema. Essa capacidade de dissipação pode ser, assim, superior às perdas geradas. Este valor ainda poderá ser melhorado, com a implementação de um sistema de agitação do ar em torno do redutor, ou com um maior número de alhetas.

A condição 2 representa uma situação facilmente alcançada e permite estar do lado da segurança, pois, num contexto empresarial, a circulação de ar assume valores de velocidades

superiores a 2 m/s. A passagem de regime natural para forçado triplicou a capacidade de dissipação.

Tabela 26: Resultados da capacidade de dissipação de energia do cárter, para as várias condições apresentadas.

| Condição   | $A_{ca}$ [m <sup>2</sup> ] | $\alpha_{ca}$ [W/m <sup>2</sup> .K] | $Q_{ca}$ [W] |
|------------|----------------------------|-------------------------------------|--------------|
| Condição 1 | 3,239                      | 10-12                               | 972- 1166    |
| Condição 2 | 3,239                      | 30                                  | 2915         |
| Condição 3 | 3,239                      | 35                                  | 3401         |
| 48 alhetas | 4,055                      | 30                                  | 3650         |

#### 4.4.2 Produto final

Com o dimensionamento de todos os componentes, já realizado, voltou a efetuar-se uma análise energética, neste caso no software *KISSsys*<sup>®</sup>. Aproveitou-se esta ferramenta, que proporciona uma análise mais rigorosa e completa. Os cálculos no software são efetuados segundo as normas e expressões já evidenciadas. Identificou-se a dissipação de energia, realizada por outros componentes que constituem o redutor.

A Tabela 27 ilustra os valores das perdas de potência, em cada tipo de componente, e na Tabela 28 indicam-se os valores da dissipação de potência por parte do cárter e de outros componentes que o constituem.

A dissipação total de calor,  $Q$ , é obtida pela Expressão (4.18):

$$Q = Q_{Ca} + Q_{base} + Q_{veios} + \Delta H_{oil} \quad (4.18)$$

que é função da dissipação:

- no cárter e alhetas,  $Q_{Ca}$ , onde ocorre uma dissipação combinada de radiação e convecção. Tal como se pode verificar na Tabela 28, este termo é o que assume o valor mais elevado, uma vez que as alhetas e as condições de circulação do ar em torno do cárter são fundamentais para a dissipação;
- na base,  $Q_{base}$ , que ocorre por condução, pelo que assume o menor valor da Tabela 28;
- nos veios,  $Q_{veios}$ , que ocorre, essencialmente, por radiação, existindo um pequeno contributo da convecção.
- da circulação do lubrificante,  $\Delta H_{oil}$ , que ocorre, essencialmente, por convecção durante a circulação do lubrificante pelo circuito de injeção. Visto que nesta conceção não ocorre injeção, este termo é eliminado.



Tabela 27: Perdas de potência nos vários componentes e a perda total, para a configuração final do redutor [KISSsys®].

| $P_{VD}$ [W] | $P_{VZP}$ [W] | $P_{VZ0}$ [W] | $P_{VL}$ [W] | Total ( $P_v$ ) [W] |
|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------------|
| 67           | 2644          | 23            | 658          | 3392                |

Tabela 28: Dissipação de energia por parte do cárter e dos veios e respetivo valor total, para a configuração final do redutor [KISSsoft®].

| Cárter + Alhetas [W] | Base [W] | Veios [W] | Total ( $Q$ ) [W] |
|----------------------|----------|-----------|-------------------|
| 3354                 | 37       | 273       | 3664              |

O software na sua análise, perante a implementação dos dados necessários para o cálculo (que descrevem o melhor possível a situação real), indica que os cálculos foram efetuados para uma convecção forçada de incidência mista com velocidade de 3 m/s. Tal abordagem, vai ao encontro do que se tinha apresentado na análise do pré-redutor, na condição 3.

Constata-se que a dissipação é superior às perdas, pelo que a quantidade e as dimensões das alhetas são adequadas a esta aplicação. No entanto, vai-se verificar que o lubrificante diminuirá a sua temperatura, sendo esta, para o caso de chapinagem, obtida através de um processo iterativo do seguinte equilíbrio,  $P_v(v_{oil}) = Q(v_{oil})$ .

O relatório técnico ISO/TR 14174-2 indica a Equação (4.19), para o calculo do valor aproximado da nova temperatura do lubrificante:

$$v_{oil,new} = \frac{\left( \frac{P_v}{\alpha_{ca} A_{ca}} + v_{air} \right) + v_{oil}}{2} = 58,9 \text{ } ^\circ C \quad (4.19)$$

No entanto, a nova temperatura poderia ser determinada considerando que as perdas não diminuiriam muito com a temperatura, visto que a diferença de valor é reduzida, e que a dissipação é assegurada pelo cárter e pelos veios, dado que são os que apresentam os maiores valores. Desta forma, identifica-se o valor da temperatura do óleo que conduz a um valor de dissipação de calor igual ao valor total das perdas da Tabela 27. Após efetuados os cálculos, o valor é de 58,1 °C.

Para as condições de funcionamento selecionadas, a nova temperatura do lubrificante assume um valor entre 58 °C e 59 °C.

#### 4.4.3 Rendimento do produto final

O rendimento de um redutor diminuiu com o aumento do número de andares, obtendo-se valores teóricos, aproximados, de 98,5 %, para um andar, e 97 % para dois andares, no caso de um redutor de engrenagens helicoidais [6].

O rendimento de redutores, tal como o projetado, deverá apresentar, pelo menos, valores próximos dos indicados. No entanto, é expectável que estes assumam valores superiores, uma

vez que, para a mesma potência, os engrenamentos vão estar menos solicitados. Não será o maior número de engrenamentos, comparativamente à configuração convencional, que levará à diminuição do rendimento, face ao aumento deste derivado da redução da carga de contacto. Por outro lado, neste caso, o segundo andar apresenta um dentado helicoidal duplo, pelo que as perdas nos rolamentos, principalmente do veio de saída, serão menores.

Perante o valor das perdas totais, percebe-se, sem realizar cálculos, que a solução apresentada possui um rendimento dentro dos limites, teoricamente, esperados. Através da Equação (4.20), pode comprovar-se tal situação.

$$\eta_{total} = \frac{P_u}{P_A} = 1 - \frac{P_T}{P_A} = \frac{3392}{375 \times 10^3} = 99,3\% \quad (4.20)$$

onde:

- $P_u$  - potência útil;
- $P_A$  - potência nominal do redutor;
- $P_T$  - potência total perdida;

Este rendimento é excelente, aproximando-se do apresentado por um redutor com um andar de redução. Este valor foi atingido devido à otimização realizada, nomeadamente, em torno das engrenagens, que são os elementos que maiores perdas apresentam. Seguem-se os rolamentos, os quais foram selecionados de maneira a obter-se a melhor solução energética e as melhores condições de funcionamento, ainda que condicionadas pela parte estrutural. Foram também inflacionadas e contabilizadas as suas alterações de vida.

O redutor concebido apresenta um regime de lubrificação misto no primeiro andar e limite no segundo (indicações da espessura específica mínima do filme lubrificante na Tabela 21). O regime limite surge por causa da maior carga nos engrenamentos (maior binário no segundo andar) e velocidades reduzidas, que impedem a geração de filme lubrificante mais espesso. Este regime de lubrificação conduz a perdas de potência maiores, pelo que o andar de saída (andar 2) é o que apresenta um maior contributo para as perdas e é o que apresenta maior tendência para surgimento de fenómenos de desgaste, “*micropitting*”, gripagem, etc.

A informação detalhada sobre a análise energética do redutor com a configuração final adotada, pode ser consultada no Anexo D.2 (Pág. 273).

## 5 Arquitetura Final

Neste capítulo, apresentam-se as dimensões finais e as características dos componentes que constituem o redutor, bem como com as respectivas justificações, processo de cálculo e seleção. Os valores resultam de processos iterativos realizados até afinar e otimizar os resultados.

### 5.1 Veios

Através das análises já realizadas, constata-se que os veios precisam de um dimensionamento cuidado, atendendo às elevadas cargas verificadas, principalmente, nos veios B e C (veios intermédios, ver Figura 10). Os elevados esforços comprometem a resistência dos veios à fadiga e à flexão, pelo que, o comprimento, o diâmetro e o material neles utilizado são parâmetros importantes a ter em conta.

O comprimento dos veios depende de um conjunto de parâmetros, tais como:

- largura total necessária em cada roda dentada;
- comprimento das pontas de veios normalizadas nos veios de entrada e de saída;
- espaçamentos entre elementos (rodas dentadas, rolamentos, estrutura do cárter, etc.);
- larguras dos rolamentos;
- espessuras das paredes do cárter e comprimentos das tampas;
- etc.

Esta dependência transforma o comprimento dos veios num parâmetro limitado, que não favorece os resultados. No entanto, como os comprimentos reduzidos apresentam uma importância acrescida para a resistência, todos estes fatores foram trabalhados para a otimização do valor do comprimento.

O material dos veios de entrada e de saída foi alterado face às escolhas iniciais. Concluiu-se que era desnecessário a aplicação de um material com as propriedades mecânicas e dureza de um aço de cementação. A sua utilização seria justificada caso as engrenagens fossem talhadas no próprio veio ou existisse necessidade de propriedades daquela grandeza. Um material deste tipo apresenta uma maior dificuldade no processo de maquinagem (resultante da sua dureza e presença de níquel) e um custo superior.

Uma solução seria o aço Ck 45, mas, como não permite obter diâmetros reduzidos, obrigaria a reestruturar o sistema com dimensões superiores, que levariam a um maior atravancamento do cárter e dos veios.

Após verificação de vários materiais adequados, para a aplicação (veios), optou-se pelo aço de construção ligado, 42 CrMo 4. As propriedades mecânicas mais importantes são evidenciadas, na Tabela 30, para os diferentes diâmetros dos varões fornecidos, uma vez que estas variam com o diâmetro do varão. Na Tabela 29, é indicado o diâmetro do varão em bruto e das secções de alojamento dos rolamentos, o comprimento, a massa e o material para cada um dos veios.

Tabela 29: Dimensão diametral, comprimento, massa e material para cada veio do redutor [23]

| Veio | $\phi_{rol}$ [mm] | $\phi_{varão}$ [mm] | $L$ [mm] | Massa [kg] | Material      |
|------|-------------------|---------------------|----------|------------|---------------|
| A    | 85                | 105                 | 313      | 13         | 42 CrMo 4     |
| B/C  | 120               | 170                 | 414      | 51         | 18 CrNiMo 7-6 |
| D    | 160               | 190                 | 391      | 66         | 42 CrMo 4     |

Tabela 30: Designação e propriedades mecânicas para o diâmetro do varão, para cada um dos veios do redutor [23].

| Ramada      | DIN           | $\phi_{varão}$ [mm] | $\sigma_S$ [MPa] | $\sigma_B$ [MPa] | $E$ [GPa] | Dureza [HB] |
|-------------|---------------|---------------------|------------------|------------------|-----------|-------------|
| RPM32       | 42 CrMo 4     | $\leq 100$          | $\geq 550$       | 800 - 950        | 200       | 241         |
| RPM32       | 42 CrMo 4     | $\leq 160$          | $\geq 650$       | 900 - 1100       | 200       | 241         |
| G15 Special | 18 CrNiMo 7-6 | $\leq 100$          | 850              | 1200             | 206       | 61 HRC      |

O diâmetro mínimo de cada veio é definido pela flecha máxima admissível a meio vão e pela flecha admissível nos engrenamentos. Posteriormente, os valores são ajustados para os diâmetros dos rolamentos ou pontas de veio normalizadas. Os diâmetros das restantes secções assumem os valores dos diâmetros dos ressalto necessários para o encosto de rolamentos e/ou engrenagens e diâmetros de estriados normalizados.

Através da análise individual de cada veio, verifica-se que os veios B e C (veios intermédios) são veios-pinhão, devido ao seu diâmetro ser superior ao admissível para alojamento de uma roda dentada. O veio deverá apresentar um diâmetro, menor ou igual a uma vez e meia o diâmetro primitivo da roda dentada a alojar, tal como indica Silva [13].

Paralelamente, esta verificação podia realizar-se aplicando as Equações (5.1) e (5.2), consoante o mecanismo de transmissão de potência a utilizar [30].

$$d_{v_{max}} = 2 r_a - 2 \times (1 + 1,25) \times 2,25 m = 2 r_a - 10,125 m, \text{ (para o estriado)} \quad (5.1)$$

$$d_{v_{max}} = 2 r_a - 2 \times (1 + 2) \times 2,25 m = 2 r_a - 13,5 m, \text{ (para a chaveta)} \quad (5.2)$$

No entanto, os veios B e C efetuam a transmissão de potência para as rodas z2 e z4, respetivamente, por intermédio de chavetas.

O veio de entrada (veio A) apresenta uma ponta normalizada da série curta, com 105 mm de comprimento e um escatel para a chaveta de acoplamento ao exterior [33]. Apresenta um outro escatel para a transmissão de potência para a roda z1.

No veio de saída (veio D), a transmissão de potência é realizada através de um estriado em envolvente, na ponta de veio e na ligação à roda z6.

### 5.1.1 Chavetas

As chavetas constituem o mecanismo de transmissão de potência mais utilizado, devido à sua fácil exequibilidade e baixo custo de implementação.

As chavetas escolhidas, para estabelecer a transmissão de potência entre os veios e as rodas dentadas, são as de faces paralelas do tipo A, uma vez que o escatel do veio é executado por meio de uma fresa de topo. Nestas chavetas, o comprimento útil corresponde à secção retangular central, isto é, o comprimento total menos a largura, tal como ilustrado na Figura 17a.

As dimensões das chavetas e dos respetivos escateis são indicadas (em função do diâmetro do veio) pela norma DIN 6885-1 [34]. As dimensões características das chavetas e dos respetivos escateis são apresentados na Tabela 32.

O material selecionado para as chavetas foi o aço C60, com as propriedades mecânicas evidenciadas na Tabela 31. Escolheu-se este material dado que o binário em cada veio é elevado, e o aço Ck 45 conduzia a comprimentos de chavetas acrescidos, para um coeficiente de segurança (arbitrado por majoração do indicado, pela norma DIN 6892, de 1,2) superior a 1,5.

Tabela 31: Designações e propriedades mecânicas do material das chavetas [*KISSsoft*®].

| Norm | DIN    | $E$ [GPa] | $\sigma_B$ [MPa] | $\sigma_S$ [MPa] | Dureza [HB] |
|------|--------|-----------|------------------|------------------|-------------|
| C60  | St60-2 | 206       | 800              | 520              | 241         |

Um dimensionamento ao corte e ao esmagamento tem de ser realizado de modo a determinar o comprimento da chaveta necessário, para o coeficiente de segurança arbitrado. O dimensionamento é, essencialmente, realizado ao esmagamento, uma vez que é este que condiciona o comprimento da chaveta, comparativamente ao realizado ao corte. As Equações (5.3) e (5.4) indicam o modo de cálculo do comprimento da chaveta, segundo o critério do corte e do esmagamento, respetivamente.

Ao corte tem-se:

$$l_{corte} = \frac{2 M_t}{b d_v \tau_{adm}} \quad (5.3)$$

Ao esmagamento :

$$l_{esmagamento} = \frac{2 M_t}{d_v \sigma_{adm} (h - t_c)} \quad (5.4)$$

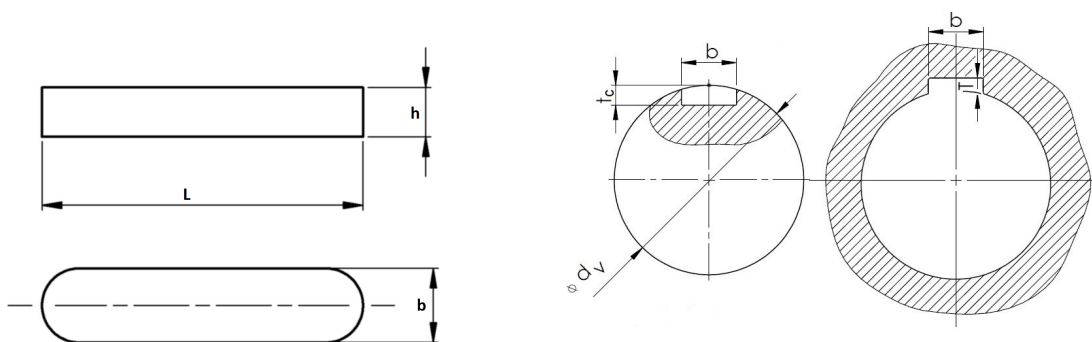
com:

$$\tau_{adm} = \frac{\sigma_S}{\sqrt{3}} \quad (5.5)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_S}{C.S.} \quad (5.6)$$

onde:

- $M_t$  - momento torsor;
- $b$  - largura da chaveta;
- $d_v$  - diâmetro do veio;
- $\tau_{adm}$  - tensão de corte admissível;
- $\sigma_{adm}$  - tensão normal admissível;
- $h$  - altura da chaveta;
- $t_c$  - altura do escatel do veio.



(a) Representação da configuração da chaveta do tipo A.

(b) Representação da configuração dos escateis do veio e do cubo, respetivamente.

Figura 17: Representação do sistema de acoplamento por chaveta [adptada de [35, 36]].

Tabela 32: Designação e dimensões das chavetas, e dimensões dos respetivos escateis [*KISSsoft*<sup>®</sup>; [34]].

| Local   | Designação               | $d_v$ | $b$ | $h$ | $L$ | $r$ | $t$ | $T$ | $s1$ | $r1$ |
|---------|--------------------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Entrada | ISO/R 773-20x12x100-St60 | 75    | 20  | 12  | 100 | 0,7 | 4,9 | 7,5 | 0,01 | 0,01 |
| Z1      | ISO/R 773-25x14x70-St60  | 86    | 25  | 14  | 70  | 0,7 | 5,4 | 9   | 0,01 | 0,01 |
| Z2/Z4   | ISO/R 773-32x18x80-St60  | 121   | 32  | 18  | 80  | 0,7 | 7,4 | 11  | 0,01 | 0,01 |

Na Tabela 33, são apresentados os valores dos coeficientes de segurança das chavetas, do escatel do cubo e do escatel do veio, obtidos através do software *KISSsoft*<sup>®</sup>. Os restantes resultados do dimensionamento das chavetas podem ser consultados no Anexo D.1 (Pág. 143).

Tabela 33: Coeficientes de segurança das chavetas e dos respetivos escateis [*KISSsoft*<sup>®</sup>].

| Local | C.S. <sub>chaveta</sub> | C.S. <sub>cubo</sub> | C.S. <sub>eiro</sub> |
|-------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| Ponta | 1,73                    | 2                    | 2,05                 |
| Z1    | 1,87                    | 3,12                 | 2,19                 |
| Z2/Z4 | 1,65                    | 4,66                 | 2,67                 |

O software *KISSsoft*<sup>®</sup> efetua o dimensionamento da chaveta recorrendo à norma DIN 6892, que apresenta diferentes métodos de cálculo para ligações por chavetas. O cálculo do coeficiente de

segurança dos escatéis é realizado pela DIN 743, visto que representa uma situação de entalhe, que compromete o componente à fadiga. Este software realiza um dimensionamento ao esmagamento.

As variáveis mais importantes para um correto dimensionamento das chavetas no software são:

- binário nominal  $T_n$  - responsável pelas tensões provocadas na chavetas e respectivos escatéis, em cada veio;
- fator de aplicação  $K_A$  - fator relativo ao contributo das características de funcionamento dos mecanismos acionador e acionado, sendo o seu valor para esta aplicação de 1,6;
- escolha da norma DIN 6885-1:1968;
- o diâmetro do veio, que juntamente com o comprimento de alojamento  $l_{tr}$ , permite caracterizar a chaveta e os escatéis, que são contabilizados nos cálculos;
- os diâmetros do cubo  $D_1$  e  $D_2$ , que caracterizam o reforço existente na engrenagem;
- a evolução da carga e identificação do tipo de carga verificada;

O dimensionamento das chavetas foi realizado tendo em conta a existência de carga cíclica e inversão de movimento. Foram consideradas estas situações para conferir maior rigor no dimensionamento e considerar os dois sentidos de rotação do redutor, mesmo que a inversão de sentido rotação seja realizada com o equipamento parado ou este apresente o sentido definido pelo sistema motor.

-distância de aplicação da carga que indica o local sujeito a maior carregamento;

- material das três partes que constituem o acoplamento.

A Figura 18 apresenta a interface de dimensionamento de chavetas no *KISSsoft*<sup>®</sup>, com todos os parâmetros que devem e/ou podem ser introduzidos.

| Dados básicos      |                         |
|--------------------|-------------------------|
| Torque nominal     | $T_n$ 7937.8528 Nm      |
| Torque máximo      | $T_{max}$ 12700.5645 Nm |
| Momento de atrito  | $T_a$ 0.0000 Nm         |
| Fator de aplicação | $K_A$ 1.6000            |

| Evolução da carga                      |                       |
|--|-----------------------|
| Com torque alternado                   | Com torque alternado  |
| Torque máximo de regresso              | $T_{max, reg}$ 0.0000 |
| Número de mudanças de sentido de carga | $N_{sc}$ 1000         |
| Número de mudanças de picos de carga   | $N_L$ 10000           |

| Geometria                      |                          |
|--------------------------------|--------------------------|
| Norma                          | DIN 6885-1:1968 Standard |
| Diâmetro do eixo               | $d$ 162.0000 mm          |
| Diâmetro externo maior do cubo | $D_2$ 600.0000 mm        |
| Diâmetro externo menor do cubo | $D_1$ 180.0000 mm        |
| Comprimento de chaveta eixo    | $l_{tr}$ 80.0000 mm      |
| Comprimento de chaveta cubo    | $l_b$ 80.0000 mm         |

| Materiais |  |
|-----------|--|
| Eixo      | 18CrNiMo7-6, Aço de cementação, endurecido por cementação    |
| Cubo      | 34 CrNiMo 6 (2), Aço beneficiado, temperado à chama/por ind. |
| Chaveta   | C60, Aço beneficiado, sem liga, beneficiado                  |

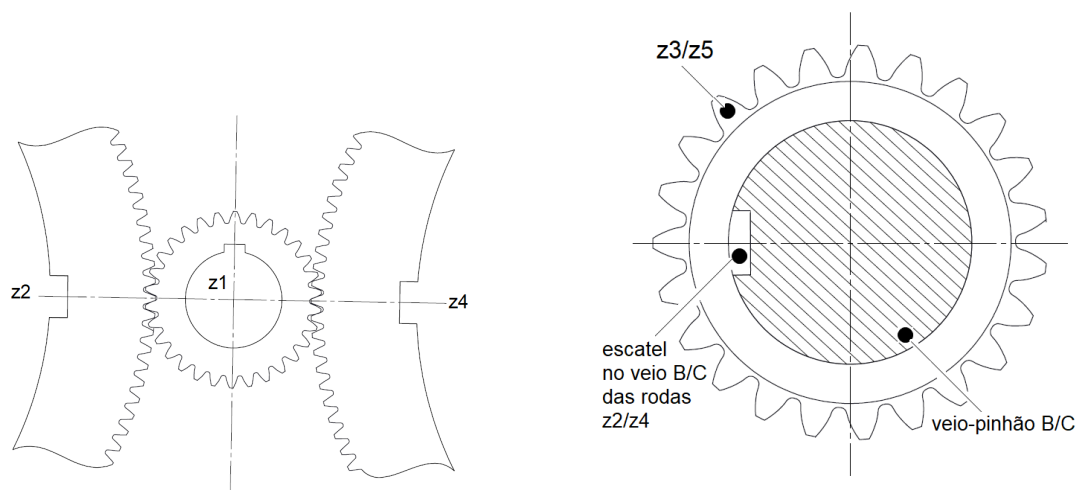
Figura 18: Interface de dimensionamento de chavetas no software *KISSsoft*<sup>®</sup>.

Um detalhe estrutural a garantir é a realização de um escatel mais comprido nas rodas dentadas, fruto de um cubo das rodas dentadas maior, num valor de 2 mm de cada lado, evitando assim o contacto do veio ou do casquilho com as chavetas.

No Capítulo 3, abordou-se a importância do número de dentes das rodas dentadas ser par ou ímpar, que se resume à obtenção de engrenamentos perfeitos e precisos, e a uma simetria de esforços.

Nesta secção, é importante referir que para se conseguir montar as rodas dentadas, conferindo-lhes um correto engrenamento, os escatéis das chavetas de acoplamento dos veios B e C (intermédios) devem apresentar um posicionamento específico. Tirando partido da construção par-ímpar, os escatéis foram realizados segundo o centro da cabeça de um dente das rodas  $z_2$  e  $z_4$  e do veio-pinhão (veios B e C). Tal solução evita o cálculo de ângulos específicos para cada veio e roda, em relação a outra referência que os componentes apresentem. Esta solução garante que o dente da roda, utilizado como referência na elaboração do respetivo escatel, está alinhado com o utilizado no veio-pinhão, permitindo estabelecer engrenamentos entre dois dentes das rodas dentadas  $z_1$  e  $z_6$  com um dente das restantes, tal como representado na Figura 19.

No veio de entrada (veio A) e no pinhão  $z_1$ , o escatel pode ser realizado, em qualquer posição a nível angular. O mesmo se aplica à realização do estriado na roda e no veio de saída, uma vez que estes tem liberdade de ajuste.



(a) Representação da elaboração do escatel no pinhão  $z_1$  (entrada) e montagem do primeiro andar.

(b) Representação da elaboração do escatel nos veios-pinhão.

Figura 19: Representação do local de elaboração dos escateis e ilustração de arquitetura de montagem dos dois andares.

### 5.1.2 Estriados

A transmissão de binário nem sempre pode ser realizada por intermédio de uma chaveta, principalmente na presença de elevada potência e reduzida velocidade (como acontece no veio de saída que apresenta um binário elevado). A utilização de uma chaveta neste acoplamento leva a um comprimento necessariamente elevado, criando incompatibilidade dimensional entre o cubo da roda  $z_6$  e o comprimento da chaveta. Tal implementação aumentaria, consideravelmente, a largura do cubo da roda e o comprimento do veio, causando problemas, principalmente, a nível da flecha e da fadiga.

A aplicação de duas chavetas não é solução para estes problemas de incompatibilidade, visto que exigiria uma elevada precisão na realização dos escatéis na roda e nos veios. Como não



existe essa precisão, tal leva a que o esforço ocorra apenas numa delas (estando a outra quase sem nenhum esforço), causando problemas sérios.

Nestes casos de elevada potência, normalmente, recorre-se ao estriado de faces paralelas, pois é fácil de elaborar e adequado para velocidades de rotação baixas, tais como a do veio de saída (veio D). Caso a velocidade de rotação fosse elevada, seria aconselhável usar um estriado de flancos em evolvente, muito utilizado na indústria automóvel [37].

Neste caso, como o diâmetro exterior do estriado de faces paralelas era inferior ao diâmetro do veio na secção de alojamento do rolamento, recorreu-se ao estriado em evolvente. Esta escolha, além de permitir aplicar um estriado normalizado adequado à aplicação, conduz a uma precisão de contacto superior. Tal precisão advém do processo de fabrico seguir o princípio de talhagem de uma engrenagem, que é um processo complexo, mas com uma precisão de fabrico elevada.

A precisão de contacto deste estriado aumentará o número de dentes em contacto, conduzindo a uma melhor distribuição do esforço, e conferindo uma maior capacidade de transmissão de potência ao estriado. A maior capacidade de carga leva a estriados de menor dimensão, pelo que, neste projeto, o comprimento da ponta normalizada foi reduzido de 200 mm para 100 mm, garantindo o coeficiente de segurança superior a 1,5 como foi arbitrado.

A ponta de veio apresenta um comprimento superior ao do estriado (100 mm), de modo a garantir a saída da ferramenta. Segundo a DIN 5480-14:2006 [38], o diâmetro da ferramenta de realização do estriado é de 60 mm, o que representa um comprimento extra de 26 mm. O valor considerado para este comprimento foi de 30 mm, como se pode verificar na Figura 20. O comprimento de talhagem segundo a mesma fonte, não deve ser superior a 2,5 do respetivo diâmetro de referência [37, 39].

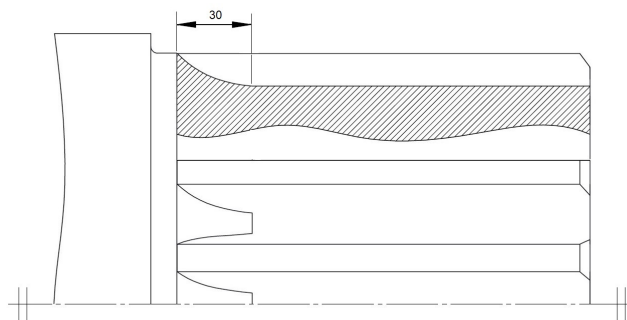


Figura 20: Representação da ponta de veio aplicada no veio D e realce do detalhe de elaboração.

Os diâmetros do estriado da ponta de veio foram selecionados de maneira a que o seu diâmetro de cabeça seja inferior ao diâmetro interior do rolamento, para permitir a passagem do rolamento e criar uma zona de batente para o acoplamento externo, e seja também inferior ao diâmetro interior  $d_3$  do anel elástico do veio, para facilitar a sua montagem, visto que as suas dimensões são elevadas e o esforço a exercer é considerável.

Na escolha do estriado para o acoplamento da roda z6, considerou-se um valor de diâmetro de pé do estriado (170 mm) superior ao do encosto do rolamento (167 mm), para garantir a saída da ferramenta.

A norma utilizada nesta seleção foi a DIN 5480-1:2006, uma vez que se adequa melhor

às necessidades, comparativamente à ISO 4156:2005. Foram escolhidas as soluções com menor número de dentes.

A norma DIN 5480-1 dimensiona os estriados em evolvente, com um ângulo de pressão limitado a  $30^\circ$ , uma vez que os ângulos de pressão de  $37,5^\circ$  e  $45^\circ$  são cobertos pela norma ISO 4156. O valor do módulo varia na faixa de 0,5 a 10 mm, com um número de dentes variável de 6 a 82.

Esta norma, contrariamente à ISO 4156 que dimensiona os estriados em séries de módulos, fá-lo em função do diâmetro de referência, independente do módulo. Isso permite adaptar os estriados a diâmetros normalizados de rolamentos de esferas e de rolos, reduzindo o número de diferentes ferramentas necessárias para a fabricação.

Os estriados selecionados apresentam as seguintes designações: DIN 5480 - 190x10x17x8h/9H, para o acoplamento da roda z6 e DIN 5480 - 150x8x17x8h/9H, para o acoplamento exterior [39].

Os valores das características dos estriados e os resultados do dimensionamento (coeficientes de segurança no cubo e veio, para cada estriado selecionado) são apresentados, na Tabela 34, para o estriado de acoplamento da roda Z6 e, na Tabela 35, para o estriado de acoplamento exterior. Todos os estriados realizados apresentam uma rugosidade no flanco  $Ra_H$  de  $1,05 \mu\text{m}$  e no pé  $Ra_F$  de  $3 \mu\text{m}$ .

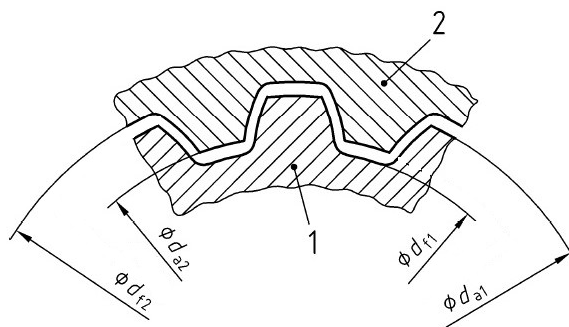


Figura 21: Representação do estriado do veio e do cubo [39].

Tabela 34: Dimensões características e coeficientes de segurança do estriado da roda Z6 [39],[KISSsoft®].

| Estriado | $m_n$ [mm] | $z$ | $b$ [mm] | $\alpha$ [°] | $x$   | $d_a$ [mm] | $d_f$ [mm] | C.S. |
|----------|------------|-----|----------|--------------|-------|------------|------------|------|
| Cubo     | 10         | 17  | 116      | 30           | -0,45 | 170        | 190        | 7,23 |
| Eixo     | 10         | 17  | 118      | 30           | 0,45  | 188        | 168        | 4,58 |

Tabela 35: Dimensões características e coeficientes de segurança do estriado de acoplamento ao exterior [39],[KISSsoft®].

| Estriado | $m_n$ [mm] | $z$ | $b$ [mm] | $\alpha$ [°] | $x$    | $d_a$ [mm] | $d_f$ [mm] | C.S. |
|----------|------------|-----|----------|--------------|--------|------------|------------|------|
| Cubo     | 8          | 17  | 100      | 30           | -0,325 | 134        | 150        | 1,69 |
| Eixo     | 8          | 17  | 100      | 30           | 0,325  | 148,4      | 132,4      | 2,46 |

Tal como no caso das chavetas, o dimensionamento foi realizado no *KISSsoft*<sup>®</sup>, sendo necessário introduzir os seguintes dados: binário nominal; fator de aplicação; dimensões do cubo; tipo de carga e distância de aplicação; seleção da norma do estriado (DIN 5480-1:2006) e escolha do estriado (dimensões normalizadas). Neste dimensionamento, tal como nas rodas dentadas, podem realizar-se modificações de dentado, o que não acontece neste projeto de conceção.

Os cálculos da geometria do dentado são processados como se de uma engrenagem se tratasse, Figura 22. Os cálculos da capacidade de carga são realizados segundo as expressões de G.Niemann, *Maschinenelemente I*, 4.<sup>a</sup> edição.

A geometria do cubo de acoplamento exterior (veio D) não foi concebida, tendo-se assumido, simplesmente, uma para realizar os cálculos. No entanto, dá para ter como referência, caso se pretenda maior coeficiente de segurança.

Dados básicos Perfil de referência Tolerâncias Carga

Norma

DIN 5480:2006 (Completo)

| $d_1$ [mm] | $d_2$ [mm] | $m$ [mm] | $z$ | $x_1$   |
|------------|------------|----------|-----|---------|
| 138.0000   | 120.0000   | 10.0000  | 12  | 0.4500  |
| 138.4000   | 124.0000   | 8.0000   | 16  | 0.2000  |
| 138.8000   | 128.0000   | 6.0000   | 22  | 0.1167  |
| 139.0000   | 130.0000   | 5.0000   | 26  | 0.4500  |
| 139.2000   | 132.0000   | 4.0000   | 34  | -0.0500 |
| 139.4000   | 134.0000   | 3.0000   | 45  | 0.2833  |
| 139.5000   | 135.0000   | 2.5000   | 54  | 0.4500  |
| 139.6000   | 136.0000   | 2.0000   | 68  | 0.4500  |
| 148.0000   | 130.0000   | 10.0000  | 13  | 0.4500  |
| 148.0000   | 130.0000   | 10.0000  | 14  | -0.0500 |
| 148.4000   | 134.0000   | 8.0000   | 17  | 0.3250  |
| 148.8000   | 138.0000   | 6.0000   | 24  | -0.0500 |

Geometria

Módulo normal  $m_n$  8.0000 mm

Ângulo de pressão na seção normal  $\alpha_n$  30.0000 °

Sentido de inclinação dente reto

Ângulo de hélice no círculo de referência  $\beta$  0.0000 °

Diâmetro do furo, exo  $d$  0.0000 mm

Diâmetro externo maior do cubo  $D_2$  190.0000 mm

Exo Cubo

Número de dentes  $z$  17 -17

Largura do dente  $b$  100.0000 100.0000 mm

Fator de deslocamento de perfil  $x^*$  0.3250 -0.3250

Qualidade (DIN 5480)  $Q$  8 9

Materiais

Exo Entrada própria

Cubo Entrada própria

(a) Interface de escolha da norma e estriado.

Dados básicos Perfil de referência Tolerâncias Carga

Resistência

Método de cálculo Niemann/Winter

Fator de aplicação  $K_a$  1.6000

Engrenagem de referência Exo

Torque nominal  $T_n$  59361.3339 Nm

Dados específicos para o método de cálculo

Torque máximo  $T_{max}$  94978.1342 Nm

Evolução da carga Com torque alternado

Número de mudanças de sentido de carga  $N_{LH}$  1000.0000

Número de mudanças de picos de carga  $N_L$  10000.0000

Fator proporcional  $K_{Hbet}$  2.0000

Engrenagem de referência

☒ cubo escalonado

Diâmetro externo menor do cubo  $D_1$  190.0000 mm

Largura da peça do cubo com D2  $c$  100.0000 mm

Distância  $a_0$  50.0000 mm

Fator proporcional  $K_{Hbet}$  1.7000

(b) Interface de introdução de dados sobre o local de elaboração e método de cálculo.

Figura 22: Escolha e dimensionamento de estriado em evolvente [*KISSsoft*<sup>®</sup>].

### 5.1.3 Flecha

No Capítulo 3, durante o pré-dimensionamento dos veios, abordou-se este tópico. Foram indicados os valores admissíveis e referiu-se a importância dos valores reais serem reduzidos e inferiores aos limites definidos.

Para quantificar a flecha, segundo cada um dos dois planos perpendiculares entre si e paralelos ao eixo do veio em análise, devem ser obtidos os correspondentes esforços radial, tangencial e axial dos engrenamentos e os momentos fletores provocados pelo esforço axial (no engrenamento correspondente).

Com os valores dos esforços perpendiculares ao eixo e dos momentos fletores, em cada direção, obtém-se o valor da sua flecha, ao longo do veio. Conjugando os dois valores de flecha em cada direção, determina-se a flecha resultante em cada engrenamento e a resultante máxima no veio. Neste projeto, os esforços radiais e os momentos fletores contribuem para a flexão do veio na direção x, flecha  $\delta x$ , e os esforços tangenciais contribuem para a flexão na direção Z, flecha  $\delta z$ .

O cálculo da flecha, para cada uma das direções, é efetuado segundo as Equações (5.7) e (5.8) [24].

$$\frac{d^2V}{dy^2} = -\frac{M_f}{E I} \quad (5.7)$$

com:

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (5.8)$$

onde:

- $V$  - deslocamento perpendicular ao eixo;
- $M_f$  - momento fletor;
- $y$  - direção do deslocamento;
- $E$  - módulo de elasticidade ;
- $I$  - momento de inércia de área;
- $d$  - diâmetro da secção do veio em análise.

Os cálculos foram efetuados no *KISSsys*®, onde se realizou o desenho dos veios com todas as suas características, e se escolheu o material para cada um deles. O software executa o cálculo do momento de inércia de área  $I$  e a distribuição do momento fletor, de cada veio, e apresenta os esboços dos momentos fletores. Estes são revelados no relatório do projeto, no Anexo D.1 (Pág. 143).

Os veios A e D (veio de entrada e saída, respetivamente) tem um módulo de elasticidade de 200 GPa e os veios B e C (veios intermédios) de 206 GPa.

Outro parâmetro, em análise, é a torção de veios, que apresenta, também, um valor máximo admissível. A torção total de veios é calculada pelas Equações (5.9) e (5.10) [24].

$$\Theta = \frac{M_t L}{I_p G} \quad (5.9)$$

com :

$$I_p = \frac{\pi \cdot d^4}{32} \quad (5.10)$$

onde:

- $V$  - deslocamento perpendicular ao eixo;
- $\Theta$  - rotação angular do veio;
- $M_t$  - momento torsor;
- $L$  - comprimento de cada secção do veio;
- $I_p$  - momento de inercia polar de área;
- $d$  - diâmetro do veio em cada secção;
- $G$  - módulo de rigidez,  $G = 8 \times 10^4$  MPa

Os valores da flecha combinada nos engrenamentos,  $\delta_g$ , são apresentados na Tabela 36, e os valores da flecha máxima e da torção total de cada veio, na Tabela 37. Nestas tabelas são também indicados os valores admissíveis destes parâmetros, obtidos pelas indicações evidenciadas na Secção 3.6.1.

Tabela 36: Valores da flecha combinada e da flecha admissível em cada um dos engrenamentos [KISSsys®].

| Roda dentada | $\delta_g$ [ $\mu\text{m}$ ] | $\delta_{adm}$ [ $\mu\text{m}$ ] |
|--------------|------------------------------|----------------------------------|
| z1           | 0,20                         | 50                               |
| z2           | 50,85                        | 50                               |
| z3           | 56                           | 70                               |
| z4           | 50,1                         | 50                               |
| z5           | 55,1                         | 70                               |
| z6           | 17,7                         | 70                               |

Tabela 37: Valores da flecha máxima e da torção total em cada um dos veios, com os repetivos valores admissíveis [KISSsys®].

| Veio | $\delta_{m\acute{a}x.}$ [ $\mu\text{m}$ ] | $\delta_{adm}$ [ $\mu\text{m}$ ] | $\Theta_{m\acute{a}x.}$ [ $^\circ$ ] | $\Theta_{adm}$ [ $^\circ$ ] |
|------|---|----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| A    | 0,21                                      | 313                              | 0,11                                 | 0,135                       |
| B    | 56,7                                      | 414                              | 0,024                                | 0,11                        |
| C    | 55,80                                     | 414                              | 0,024                                | 0,11                        |
| D    | 17,8                                      | 391                              | 0,158                                | 0,17                        |

Os valores da flecha nas rodas dentadas do primeiro andar são superiores aos admissíveis, num erro máximo de 1,7 %. Isto acontece uma vez que o módulo é reduzido e os esforços são elevados, levando assim a valores admissíveis baixos e a valores reais elevados, respetivamente. Esta é a melhor solução encontrada, uma vez que o aumento do diâmetro dos veios conduz à implementação de rolamentos com maior largura, que impõe um aumento do comprimento dos veios. A redução de flecha que é conseguida com o aumento do diâmetro do veio é inferior ao aumento desta provocada pelo aumento do comprimento dos veios. Para melhorar os resultados, realizou-se, após a definição dos diâmetros normalizados dos componentes alojados, uma reestruturação das

secções não normalizadas, aumentando-lhes o diâmetro.

#### 5.1.4 Fadiga

O estudo da fadiga é um tópico importante no dimensionamento dos veios, pois permite verificar a integridade estrutural destes e identificar as alterações necessárias a realizar, de forma mais focada e localizada, em certas secções.

Deste modo, com recurso aos softwares *KISSsys*<sup>®</sup> e *KISSsoft*<sup>®</sup>, realizou-se o estudo à fadiga de cada veio, segundo a norma DIN 743.

A norma DIN 743 apresenta uma metodologia de dimensionamento de eixos e de veios, e conduz à verificação da segurança quanto à deformação permanente (evitar a deformação plástica) e quanto à fadiga [40, 41].

Esta norma exige rigor na sua utilização e na introdução dos dados necessários para efetuar os cálculos. Destaca-se, a necessidade da indicação correta das propriedades mecânicas e da informação sobre a geometria com que foram determinadas (diâmetro dos provetes  $d_B$ , visto que as características de resistência dependem da secção reta, e devem ser obtidas a partir das características para  $d_B$ , afetadas de fatores de conversão para o diâmetro de interesse).

Dada a importância das propriedades mecânicas dos materiais, foram introduzidos no software os valores destas, para um diâmetro de referência  $d_B$  igual ao do varão em bruto. Isto foi realizado para contornar o cálculo das propriedades, por parte do software, para cada uma das secções de um veio. O software realiza o cálculo em função do diâmetro de cada secção, onde deveria realizar em função do diâmetro do varão em bruto (varão de material com diâmetro de fornecimento e sem maquinagem). Com este procedimento, o software efetua os cálculos dos vários parâmetros, com as mesmas propriedades para todas as secções.

O cálculo efetuado pelo software, considerando o diâmetro de cada secção, apresenta valores próximos dos obtidos pelo processo adotado, uma vez que as propriedades não variam muito com o diâmetro, principalmente, para pequenas diferenças.

As propriedades mecânicas dos materiais para o diâmetro em bruto foram obtidas nos catálogos destes e, paralelamente, através de cálculos, que envolvem o coeficiente tecnológico de tamanho  $K_1(def)$ . Esses cálculos foram efetuados com base nas Equações (5.11) e (5.12), e o coeficiente tecnológico de tamanho  $K_1$  é obtido pelas Equações (5.13) e (5.14) [40, 41].

Os valores das tensões de limite elástico e rotura para o diâmetro bruto, obtêm-se em função dos valores para o diâmetro de referência,  $d_B = 16$  mm, e o  $K_1(def)$ .

$$\sigma_{B'} = K_1(def) \sigma_B \quad (5.11)$$

$$\sigma_{S'} = K_1(def) \sigma_S \quad (5.12)$$

Todos os veios apresentam um diâmetro bruto dentro da gama, 85-180 mm, pelo que a expressão do coeficiente tecnológico de tamanho para os veios A e D (entrada e saída) é:

Aços de construção ( $32 < d_{eff} < 300$ )

$$K_1(d_{eff}) = 1 - 0,26 \log \left( \frac{d_{eff}}{32} \right) \quad (5.13)$$

e para os veios C e D ( veios intermédios) a equação é:

Aços de tempera e revenido ( $100 < d_{eff} < 300$ )

$$k_1(d_{eff}) = 1 - 0,26 \log \left( \frac{d_{eff}}{16} \right) \quad (5.14)$$

Também é necessário indicar os valores de resistência à fadiga do material em causa, que são calculados pelas Equações (5.15),(5.16) e (5.17), por indicação da norma DIN 743.

Esforço normal:

$$\sigma_{zdw} \simeq 0,4 \sigma_{B'} \quad (5.15)$$

Flexão:

$$\sigma_{bw} \simeq 0,5 \sigma_{B'} \quad (5.16)$$

Torção:

$$\tau_{tw} \simeq 0,3 \sigma_{B'} \quad (5.17)$$

Os valores introduzidos no software, para cada veio, apresentam-se na Tabela 38.

Tabela 38: Propriedades mecânicas para o diâmetro bruto e resistência à fadiga do material, para cada veio.

| <b>Veio</b> | <b><math>\sigma_{S'}</math> [MPa]</b> | <b><math>\sigma_{B'}</math> [MPa]</b> | <b><math>\sigma_{zdw}</math> [MPa]</b> | <b><math>\sigma_{bw}</math> [MPa]</b> | <b><math>\tau_{tw}</math> [MPa]</b> | <b><math>K_1(d_{eff})</math></b> |
|-------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Entrada     | 800                                   | 550                                   | 320                                    | 400                                   | 240                                 | 0,727                            |
| Interm.     | 871                                   | 617                                   | 348                                    | 435                                   | 261                                 | 0,7265                           |
| Saída       | 750                                   | 500                                   | 300                                    | 375                                   | 225                                 | 0,682                            |

Um parâmetro importante na análise à fadiga, e necessário definir no software, é a dependência da resistência à fadiga da tensão média,  $\sigma_m$ . A norma indica dois casos, para caraterizar esta situação:

- caso 1,  $\sigma_m = \text{const.}$ , se depois de uma alteração de carregamento, a amplitude de tensão mudar mas a tensão média se mantiver constante.
- caso 2,  $\sigma_{max}/\sigma_{min} = \text{const.}$ , se quando o carregamento mudar, a relação entre a tensão máxima e mínima (ou a relação de amplitude de tensão/tensão média), permanecer constante.

Na análise realizada, optou-se pelo caso 2, que é o mais conservador e o que se adequa melhor à situação. O caso 1 levaria a situações de variações simétricas dos valores extremos, ao contrário do que acontece no caso 2, em que a alteração do carregamento ocorre no mesmo sentido para ambas as tensões (máxima e mínima). Neste redutor, prevê-se que as alterações ocorram no mesmo sentido.

A explicação detalhada do processo de cálculo pode ser consultada na norma DIN 743. Nesta secção, é, apenas, apresentado o conteúdo que influenciou e contribuiu para a obtenção das variáveis de entrada e saída.

Para terminar a exposição do processo de cálculo, apresenta-se as Equações (5.18) e (5.19), de cálculo dos coeficientes de segurança. No caso de esforço normal, flexão, e torção, o cálculo de verificação à fadiga é:

$$\frac{1}{S_D} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{zd,a}}{\sigma_{zd,ADK}} + \frac{\sigma_{b,a}}{\sigma_{b,ADK}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{t,a}}{\tau_{t,ADK}}\right)^2} \quad (5.18)$$

enquanto a verificação da resistência estática à deformação permanente consiste no cálculo de:

$$\frac{1}{S_F} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{zd,max}}{\sigma_{zd,FK}} + \frac{\sigma_{b,max}}{\sigma_{b,FK}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{t,max}}{\tau_{t,FK}}\right)^2} \quad (5.19)$$

No *KISSsys*®, devem ser preenchidos, os seguintes campos, para se efetuar o cálculo à fadiga:

- material e respetivas propriedades;
- diâmetro do varão em bruto;
- estado com tratamento térmico;

Este parâmetro indica se o tratamento é realizado, antes ou após do processo de maquinaria.

- caso de dependência da resistência à fadiga da tensão média (caso 1 ou caso 2);
- fatores de segurança admissíveis (a norma indica um valor de 1,2; o valor arbitrado foi de 1,5) ;
- tipo de carregamento (constante ou cíclico);

As Tabelas 39, 40, 41 e 42 apresentam os valores dos coeficientes de segurança obtidos na análise à fadiga, nas secções críticas de cada veio. A cada tabela corresponde uma figura (Figuras 23, 24 e 25), com a representação da configuração do veios e das secções críticas respetivas. As secções críticas do veio C são iguais às do veio B.



Tabela 39: Coeficientes de segurança à fadiga nas secções críticas do veio A [KISSsys®].

| Secção | Tipo         | Posição [mm] | $S_{Fadiga}$ | $S_{Estatico}$ |
|--------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| A-A    | Ressalto     | 105          | 4,65         | 5,2            |
| B-B    | Escatel      | 100          | 5,1          | 5,4            |
| C-C    | Escareamento | 194          | 5,2          | 7,4            |
| D-D    | Resslato     | 200          | 6,1          | 7,8            |

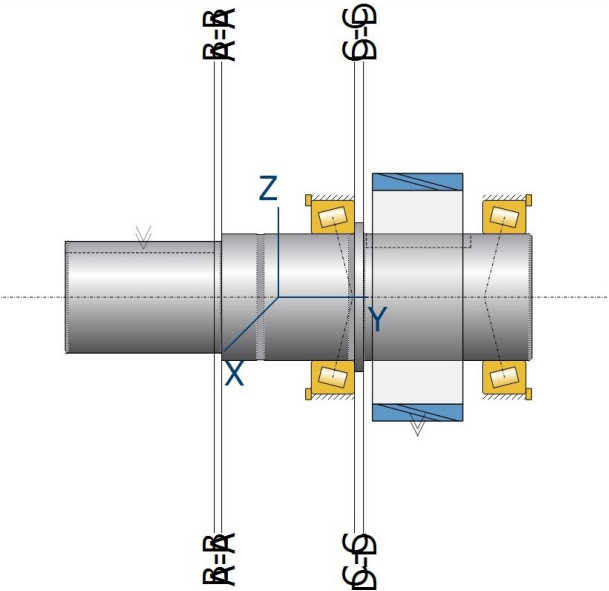


Figura 23: Representação do veio A (veio de entrada) e indicação das secções críticas [KISSsys®].

Tabela 40: Coeficientes de segurança à fadiga nas secções críticas do veio B [KISSsys®].

| Seção | Tipo     | Posição [mm] | $S_{Fadiga}$ | $S_{Estatico}$ |
|-------|----------|--------------|--------------|----------------|
| A-A   | Ressalto | 142          | 5,5          | 8,8            |
| B-B   | Escatel  | 140          | 5,9          | 8,9            |
| C-C   | Liso     | 140          | 9,6          | 8,9            |
| D-D   | Ressalto | 340,6        | 8            | 30,7           |

Tabela 41: Coeficientes de segurança à fadiga nas secções críticas do veio C [KISSsys®].

| Seção | Tipo     | Posição [mm] | $S_{Fadiga}$ | $S_{Estatico}$ |
|-------|----------|--------------|--------------|----------------|
| A-A   | Ressalto | 142          | 5,79         | 8,91           |
| B-B   | Escatel  | 140          | 6,20         | 8,93           |
| C-C   | Liso     | 140          | 9,77         | 8,93           |
| D-D   | Ressalto | 340,6        | 11,35        | 34,58          |

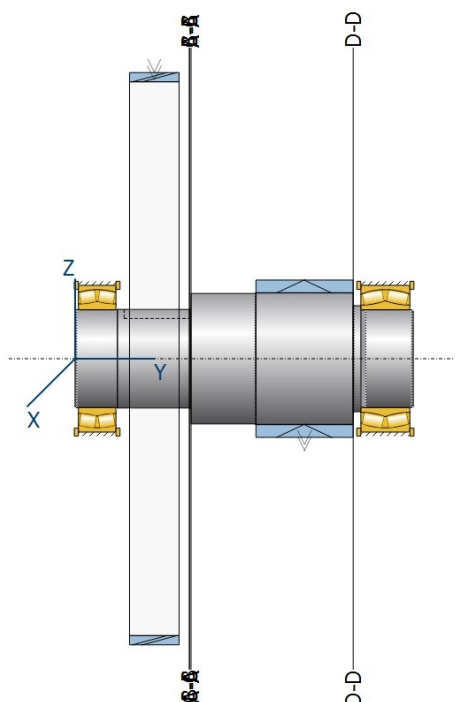


Figura 24: Representação do veio B e C (veios intermédios) e indicação das secções críticas [KISSsys®].

Tabela 42: Coeficientes de segurança à fadiga nas secções críticas do veio D [KISSsys®].

| Seção | Tipo     | Posição [mm] | $S_{Fadiga}$ | $S_{Estatico}$ |
|-------|----------|--------------|--------------|----------------|
| A-A   | Ranhura  | 199,435      | 1,51         | 2,51           |
| B-B   | Estriado | 291          | 1,79         | 1,54           |
| C-C   | Ressalto | 261          | 1,95         | 2,2            |
| D-D   | Ressalto | 160          | 2,23         | 315            |

A restante informação (processo de cálculo detalhado e representação gráfica das tensões verificadas, em cada veio) encontra-se no Anexo D.1 (Pág. 143).

O veio D é o que possui os valores mais próximos do arbitrado (1,5), na secção A-A (ranhura do anel elástico) e na secção B-B (saída da ferramenta). Na secção A-A, atinge-se um coeficiente de segurança baixo devido à geometria retangular com aresta “vivas” da ranhura e do

elevado binário no veio. Na secção B-B, os coeficientes de segurança não contabilizam a saída da ferramenta, visto que o software não permite detalhá-la, pelo que os valores na realidade serão maiores. O software considera um ressalto no material.

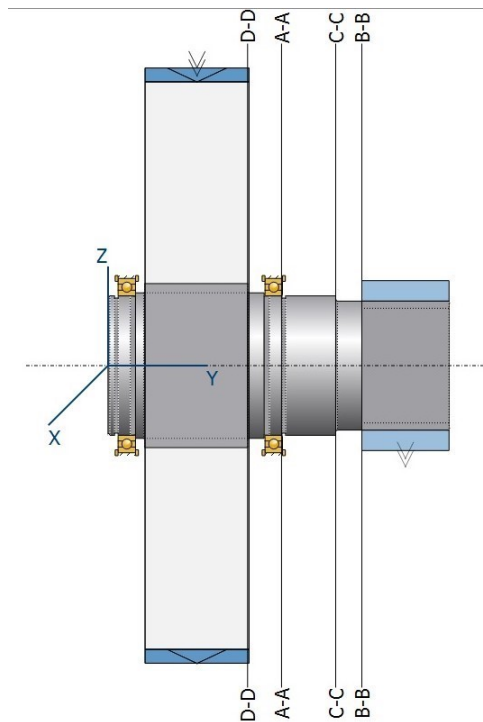


Figura 25: Representação do veio D (veio saída) e indicação das secções críticas [KISSsys®].

## 5.2 Rolamentos

Os rolamentos foram dimensionados em função dos valores dos esforços nos apoios (resultantes dos esforços dos engrenamentos) e do tipo de esforço (axial, radial ou ambos). Para cada apoio, escolheu-se o rolamento que melhor se adequava ao local de alojamento e apresentava as menores perdas de potência (otimização da conceção do redutor).

Nos veios intermédios B e C, os rolamentos continuam a ser auto-compensadores de rolos cilíndricos, de duas pistas, para acomodarem os desalinhamentos angulares dos veios, resultantes dos elevados esforços. Contrariamente ao que tinha sido concebido, inicialmente, os rolamentos não serão todos iguais. A nova configuração apresenta rolamentos iguais na face de entrada e na face de saída, diferentes entre si, uma vez que, não existe necessidade de implementar rolamentos sobredimensionados na face de entrada.

Os rolamentos do veio de entrada (veio A) continuam a ser cónicos e iguais em ambos os apoios, para acomodar as elevadas forças axiais, em ambos os sentidos de rotação. Nestes rolamentos é importante focar que existe a necessidade de realizar um ajuste, uma pré-carga inicial, garantindo, assim, o correto funcionamento.

Os rolamentos aplicados no veio de saída (veio D) são rolamentos de esferas visto que não existem esforços axiais. Caso surjam, devido à fricção de um destes com o postigo, a quando a flexão do mesmo, os esforços serão reduzidos. Estes rolamentos foram montados com uma configuração livre-fixo, sendo livre no postigo e fixo na parede do cárter.

A vida de um rolamento (horas de funcionamento) é um dado importante, principalmente na presença de lubrificante contaminado com partículas de desgaste dos rolamentos, das engrenagens e dos vedantes, podendo, também, existir uma contaminação externa.

Deste modo, torna-se necessário contabilizar a influência das impurezas na vida útil dos rolamentos. O parâmetro de modificação da vida dos rolamentos  $a_3$ , inclui vários parâmetros, que apresentam um efeito negativo na vida dos rolamentos, tais como as impurezas. A redução da vida dos rolamentos é obtida segundo a norma ISO 281, utilizando esse fator de modificação.

Um dos principais parâmetros é a existência, ou não, de filtragem do lubrificante. Neste caso, como a lubrificação é por chapinagem, não existe. Dentro da opção sem filtragem, no software, surge a indicação da norma que rege as impurezas e do código que caracteriza o estado de contaminação.

A caracterização do estado de contaminação do óleo, segundo a ISO 4406:1999, é realizada através de um código que contempla três frações. Cada uma delas é identificada por um número que traduz o número de partículas existente em cada 100 ml de lubrificante, para cada grupo de partículas. Na Figura 26, é representado o processo de obtenção desse código, nomeadamente o código que caracteriza o estado de contaminação deste projeto.

O número de partículas de cada grupo é aproximado, podendo ser obtido por via experimental ou por aplicação de conhecimentos empíricos. Num redutor de engrenagens existe um número elevado de partículas, destacando-se a presença de partículas de dimensões consideráveis. A norma ISO 4406:1999 estabelece, para cada grupo de partículas, as seguintes dimensões:  $\geq 4\mu\text{m}$ ;  $\geq 6\mu\text{m}$ ;  $\geq 16\mu\text{m}$  [42, 43].

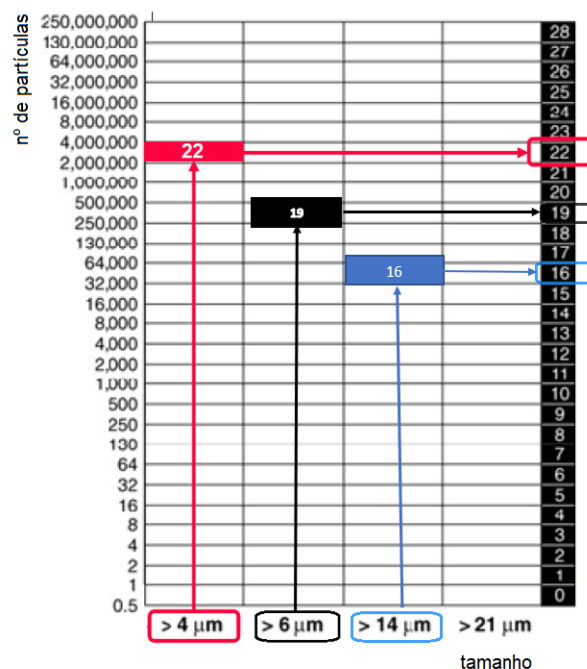


Figura 26: Processo de caracterização do estado de contaminação do lubrificante [43]

As normas ISO 4406 e ISO 281 relacionam-se entre si, na medida em que, consoante o código que caracteriza o grau de impurezas, surgirá um coeficiente,  $e_c$ , que a norma ISO 281 utiliza para

calcular a vida efetiva do rolamento. Este coeficiente é calculado pela Equação (5.20).

$$e_c = \frac{\sigma_{max,s}/\text{impurezas}}{\sigma_{max,c}/\text{impurezas}} \quad (5.20)$$

e varia entre,  $0 < e_c < 1$ , representando um estado de alta e de reduzida contaminação, respetivamente.

Juntamente com o contributo das impurezas, é contabilizado o contributo da viscosidade e da temperatura lubrificante, do material do cárter, do carregamento e da capacidade do rolamento, no parâmetro  $a_3$  que pertence ao cálculo da vida efetiva do rolamento,  $L_{mnh}$ , segundo a Equação (5.21):

$$L_{mnh} = L_{10} a_1 a_2 a_3 \quad (5.21)$$

com:

$$a_3 = f\left(\frac{e_c C_u}{P}, K\right) \quad (5.22)$$

onde:

- $L_{mnh}$  - vida útil do rolamento;
- $L_{10}$  - vida nominal básica;
- $a_1$  - fiabilidade;
- $a_2$  - propriedades do rolamento;
- $a_3$  - condições de operação;
- $e_c$  - estado de contaminação;
- $C_u$  - tensão limite de fadiga;
- $P$  - carga dinâmica equivalente;
- $K$  - fator de lubrificação.

A escolha do material do cárter não teve em consideração o seu contributo nos rolamentos, contrariamente à viscosidade e à temperatura do lubrificante, que também apresentam um contributo na otimização das engrenagens (apresentado no Capítulo 3).

A Tabela 43 indica as denominações dos rolamentos, juntamente, com as suas dimensões estruturais e de encosto. Na Tabela 44, são apresentados os valores da durabilidade, do coeficiente de segurança e das perdas de potência, de cada rolamento.

Para avaliar o correto funcionamento destes, deve verificar-se se os valores de desalinhamento real,  $r_r$ , são inferiores ao valor máximo admissível,  $r_{radm}$ , para cada rolamento, e se os deslocamentos axiais,  $u_y$ , são, igualmente, inferiores à folga interna,  $u_A$ . Todos estes valores são apresentados na Tabela 45.

O dimensionamento e a análise energética dos rolamentos efetuaram-se no *KISSsys*®. No Anexo A.2 (Pág. 128), é apresentado, de forma resumida, o conjunto de equações e parâmetros que permite realizar o dimensionamento destes.

Tabela 43: Denominações e dimensões estruturais e de fixação dos rolamentos [44].

| Local              | Denominação               | Fix.int [mm] | Fix.ext [mm] | Qt. |
|--------------------|---------------------------|--------------|--------------|-----|
| Veio A             | Koyo 32017JR - 85x130x29  | min. 93,5    | 117-121,5    | 2   |
| Veio B/C - Entrada | Koyo 23024RH - 120x180x46 | min. 132     | máx. 170     | 2   |
| Veio B/C - Saída   | Koyo 24024RH - 120x180x60 | min. 132     | máx. 170     | 2   |
| Veio D             | Koyo 6832 - 160x200x20    | min. 166,5   | máx. 193,5   | 2   |

Tabela 44: Durabilidade, coeficiente de segurança e perda de potência de cada rolamento [*KISSsys*®]

| Local  | Rolamento | $C$ [MPa] | $C_0$ [MPa] | $C_u$ [MPa] | $L_{nh}$ [h] | $L_{mnh}$ [h] | $S_0$ | $P_{VL}$ [W] |
|--------|-----------|-----------|-------------|-------------|--------------|---------------|-------|--------------|
| Veio A | Rol 1     | 189       | 234         | 35,5        | 1000 000     | 1000 000      | 72,9  | 112,326      |
| Veio A | Rol 2     | 189       | 234         | 35,5        | 20 226       | 29 721        | 18,9  | 263,672      |
| Veio B | Rol 3     | 394       | 524         | 51,6        | 171 149      | 95 287        | 13,7  | 37           |
| Veio B | Rol 4     | 484       | 709         | 61,8        | 52 199       | 22 331        | 10,5  | 103,634      |
| Veio C | Rol 5     | 394       | 524         | 51,6        | 184 333      | 104 377       | 14,0  | 36,610       |
| Veio C | Rol 6     | 484       | 709         | 61,8        | 55 377       | 23 958        | 10,7  | 101,170      |
| Veio D | Rol 7     | 60,5      | 56,9        | 2,2         | 1000 000     | 1000 000      | 35,7  | 1,731        |
| Veio D | Rol 8     | 60,5      | 56,9        | 2,2         | 1000 000     | 1000 000      | 28,3  | 1,82         |

Tabela 45: Desalinhamentos reais e admissíveis, e deslocamentos e folgas axiais, nos rolamentos [*KISSsys*®].

| Rolamento | Designação       | $r_r$ [rad] | $r_{radm}$ [rad] | $u_y$ [ $\mu\text{m}$ ] | $u_A$ [ $\mu\text{m}$ ] |
|-----------|------------------|-------------|------------------|-------------------------|-------------------------|
| Rol.1     | Rolos Cónicos    | 0,001421    | $\leq 0,0009$    | 11                      | 10                      |
| Rol.2     | Rolos Cónicos    | 0,001882    | $\leq 0,0009$    | 10                      | 10                      |
| Rol.3     | Auto-compensador | 0,0000171   | $\leq 0,026$     | 10                      | 10                      |
| Rol.4     | Auto-compensador | 0,000124    | $\leq 0,035$     | 10                      | 10                      |
| Rol.5     | Auto-compensador | 0,000169    | $\leq 0,026$     | 10                      | 10                      |
| Rol.6     | Auto-compensador | 0,000124    | $\leq 0,035$     | 10                      | 10                      |
| Rol.7     | Esferas          | 0           | 0,0023-0,0034    | 0                       | 10                      |
| Rol.8     | Esferas          | 0           | 0,0023-0,0034    | 0                       | 10                      |

### 5.2.1 Pré-carga

Há situações em que o ajuste de rolamentos precisa de ser pré-carregado, isto é, requer uma folga operacional negativa. Essa pré-carga obtém-se com recurso a uma mola, uma anilha de pré-tensão ou por aperto(atraves de uma porca, encosto de uma tampa, etc., por exemplo).

A pré-carga é tipicamente expressa, como uma força ou como um deslocamento a aplicar. Os seus valores empíricos são obtidos a partir de conceções existentes e certificados, que podem ser aplicados em projetos semelhantes, ao contrario do caso de conceções diferentes, em que se deve recorrer, essencialmente, a métodos práticos [45].

No método de cálculo aproximado não é possível identificar totalmente todos os fatores que influenciam a aplicação. Isto leva a que a precisão dos resultados calculados seja uma função da proximidade entre a temperatura de funcionamento estimada e a real, e do comportamento elástico dos componentes associados, principalmente do cárter. Por sua vez, quando é obtida no momento da montagem, recorrendo a uma chave dinamométrica (controlando o binário de atrito nos corpos rolantes) os rolamentos devem estar à temperatura ambiente e não submetidos a nenhuma outra carga.

Dependendo do tipo de rolamento, a pré-carga pode ser radial ou axial. Para os rolamentos em análise (rolamentos de rolos cónicos), a pré-carga é, geralmente, axial. Nestes rolamentos, a carga radial produz uma carga axial que deve ser contabilizada a quando do funcionamento destes. A carga axial interna,  $F_{ai}$ , produzida nestes rolamentos pode ser determinada pela Expressão (5.23), em função da carga radial externa,  $F_r$ , e do fator de cálculo (função do tipo de rolamento),  $Y$ :

$$F_{ai} = 0,5 \cdot \frac{F_r}{Y} \quad (5.23)$$

Quando o rolamento é apenas submetido a uma carga radial  $F_r$ , deve aplicar-se uma carga axial  $F_a$  da mesma magnitude que a da carga axial interna. No caso dessa carga axial externa ser inferior (menos elementos rolantes estarão sujeitos a carga) reduzindo-se assim a capacidade de carga do rolamento. Nos casos em que existe um carregamento axial externo, pode ser necessário pré-carregar os rolamentos, para compensar a folga (que surge quando o rolamento carregado axialmente se deforma elasticamente) e para obter uma distribuição de carga mais favorável, no rolamento axialmente descarregado [44].

Existem dois métodos para realizar o pré-carregamento: o ajuste individual e o ajuste coletivo.

Num ajuste individual, cada rolamento é ajustado, separadamente, recorrendo a porcas, calços, anilhas espaçadoras, etc. Para garantir que a pré-carga nominal estabelecida seja obtida, com o desvio mínimo possível, devem ser realizados procedimentos de medição e inspeção.

O ajuste individual pode acomodar uma tolerância variável para que, se os componentes individuais forem produzidos com tolerâncias normais, a pré-carga desejada possa ser obtida com um grau de precisão relativamente alto [45].

No ajuste coletivo, também designado por "ajuste estatístico aleatório"( como é o caso deste trabalho), os componentes que constituem o agrupamento de peças por veio são fabricados

com tolerâncias, havendo assim que contabilizá-las, de modo a obter-se o ajuste pretendido. Para evitar altos custos de maquinagem e o uso de rolamentos de precisão, assume-se que os valores limites das tolerâncias não ocorrem em todos os componentes. Isto leva a que seja, estatisticamente, improvável a ocorrência dos extremos na soma de tolerâncias. No entanto, a pré-carga necessária deve ser obtida com o mínimo de folga possível, devendo as tolerâncias de fabricação ser reduzidas. A vantagem de ajuste coletivo é que não é necessário nenhuma inspeção ou equipamento extra, na montagem dos rolamentos [44].

O importante na obtenção da pré-carga é não exceder o valor ótimo. Quando isso acontece, gera-se elevada fricção e um aumento do calor, que conduzem à redução substancial da vida útil do rolamento. É também importante, para o caso dos rolamentos de rolos cónicos, girar várias vezes o eixo, a fim de que os corpos rolantes assentem, corretamente, na estrutura do rolamento.

Existem vários métodos para obter o pré-carregamento necessário:

- método do deslocamento axial;
- método do momento de fricção;
- método da força direta.

Neste projeto, optou-se pelo método do deslocamento axial, visto ser o mais simples e fácil de realizar e o mais económico. Consiste em identificar o comprimento efetivo do componente que realizará o pré-esforço, bem como o valor do pré-esforço. Após a obtenção desta informação, esse elemento é retificado para a dimensão efetiva e realiza-se a montagem. Nesta conceção, o componente de ajuste é o espaçador da entrada.

### 5.3 Cártter

O cártter é um componente primordial para efetuar o suporte de todos os elementos e servir de reservatório para o lubrificante. Deste modo, é importante definir, corretamente, as suas dimensões, o processo de fabrico e o material, de maneira a conseguir-se obter uma estrutura resistente, de fabrico fácil e barato, e de reduzido atravancamento e peso.

O cártter concebido é bipartido, com plano de separação horizontal coincidente com os eixos dos veios, e obtido por fundição em areia. A ligação das duas metades será realizar-se-á através de conjuntos parafuso-porca.

A espessura,  $t$ , do cártter pode ser obtida pela Equação (5.24), que contabiliza a maior dimensão deste [30],  $L$ . No entanto, perante discrepâncias de dimensões, efetuou-se o calculo também para o valor médio das três principais dimensões,  $L_{med}$ .

$$t = 0,01L + 6 \text{ (mm)} \quad (5.24)$$

Para a situação de dimensão máxima,  $L = 1718$  mm, o valor é de 23 mm e para a situação de valor médio,  $L_{med} = 955$  mm, é de 16 mm.



Estes resultados são valores indicativos da espessura do cárter, uma vez que esta depende dos esforços e do material. Contudo, estes valores são muito utilizados e admissíveis em fundição.

Para verificar a adequação destes valores, na aplicação em causa, realizou-se uma análise estrutural recorrendo ao software *Solidworks*®.

É importante considerar a largura da aba do plano de apartação, uma vez que é um ponto fuga de óleo e, por isso, não deverá ser grande. No entanto, esta é função das larguras dos vários componentes que são alojados, dos requisitos impostos pela fundição e do diâmetro da cabeça dos parafusos de união.

Na Tabela 46, são apresentadas as dimensões interiores e exteriores do cárter, da espessura da parede e da largura da aba do plano de apartação, e, na Figura 27, pode observar-se a representação do redutor concebido, podendo-se identificar os detalhes abordados. A nomenclatura assumida foi: C - comprimento; L - largura; H - altura ; i - interior; e - exterior.

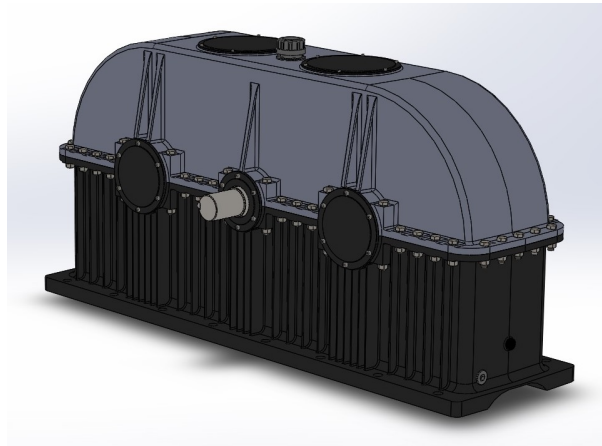


Figura 27: Representação do redutor projetado [*Solidworks*®].

Tabela 46: Dimensões da geometria do cárter.

| $C_i$ [mm] | $L_i$ [mm] | $H_i$ [mm] | $C_e$ [mm] | $L_e$ [mm] | $H_e$ [mm] | $t$ [mm] | $l_{aba}$ [mm] |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|----------------|
| 1578       | 295        | 730        | 1718       | 435        | 770        | 18       | 64             |

Outras dimensões importantes são as alturas entre os eixos do veio de entrada e de saída, e a base de assentamento das patas (normalizada para facilitar a montagem e acoplamento deste redutor a outros sistemas na sua entrada e saída). Esta medida normalizada é apresentada em séries, desde a I à IV, na norma ISO 496-1:1973 [46]. Só deverá ser aplicada, quando todos os equipamentos acoplados se encontram sobre o mesmo apoio.

Após definição das dimensões necessárias para o cárter, ajustou-se essa altura para um valor normalizado, de 425 mm.

### 5.3.1 Processo de fabrico

A escolha dos processos tecnológicos para a obtenção de vários componentes deste redutor é essencial, visto que qualquer processo apresenta limitações e inconvenientes, que levam à

restrição da liberdade do traçado. No caso da estrutura exterior do redutor, devido à sua complexidade e envergadura, os processos indicados seriam essencialmente a construção soldada ou a fundição. São os que apresentam um menor tempo e custo de fabricação associados a um reduzido desperdício de material [47].

Ambas as soluções seriam perfeitamente aceitáveis para este caso. No entanto, a fundição permite uma maior liberdade de traçado (limitações reduzidas na liberdade de escolha de formas), boa produtividade, garantia de estanquidade, menores concentrações de tensões e permite a obtenção integral da peça [48]. Como qualquer processo, a fundição apresenta limitações, associadas ao custo de produção, de pequenas séries ou peças individuais, e defeitos que podem ocorrer em situações de geometrias muito complexas, ou de mau dimensionamento.

Neste caso em concreto, além da geometria geral ser simples, existem as alhetas na metade inferior e os reforços na metade superior, que complicam o processo de obtenção por soldadura. Assim, a fundição permite, com a sua liberdade de traçado, obter as peças com a máxima resistência e o mínimo de material.

O produto final da fundição deve apresentar sobre-espessuras bem definidas para uma posterior maquinagem, de maneira a que não ocorram os casos extremos de dimensões inferiores ao pretendido ou uma grande quantidade de material a maquinar. Neste trabalho, não foram definidos os valores das sobre-espessuras visto, que tal depende do material, do processo e da forma de moldação, que obrigaria um estudo mais pormenorizado do processo de fabrico em si [47, 48].

No entanto, foram atribuídos valores às concordâncias (raios de concordância) necessárias em fundição, de modo a evitar defeitos nas peças. Estas devem ser aplicadas nas esquinas, transições de espessuras e término de superfícies, sendo função das superfícies que se interseitam e do material em utilização.

Os valores das concordâncias, que devem ser aplicados para o caso de ferro fundido nodular, são na ordem dos 0,3 a 0,8 da espessura do elemento, bem como da maior espessura ou também da média das espessuras dos elementos que se interseitam. Em fundição, o aumento da espessura deve ser gradual e as dimensões opostas devem ser, no máximo, o dobro uma da outra.

Um outro dado importante são as espessuras limites, em que, para fundição de precisão, a mínima pode ser de 3 mm e a máxima de 120 mm. Tais valores dependem do material e da configuração da peça, mas as limitações concentram-se na contração (em peças maciças) e na concentração de calor nas zonas internas (últimas a solidificar), podendo ocorrer rechupes.

A fim de eliminar rechupes, evitar microporosidades e macroporosidades e conseguir uma redução da concentração de tensões (devido à sua elevada contração em zonas maciças, que podem originar fissuras), devem ser implementados alimentadores suficientes e em dimensões adequadas, um menor número de planos de apartação e de machos. Desta forma, é necessário ter em atenção a contração do material utilizado, que neste caso é de 1 a 5 %, desde a temperatura de vazamento até ao fim da solidificação.

Um outro cuidado a ter, na conceção da peça, é a implementação de saídas para se conseguir desmoldar o modelo da moldação em areia (molde), sem que ocorra algum dano. São aconselháveis valores superiores a 1°, sendo adequados para este caso em concreto, valores entre 2° a 3°, consoante as geometrias e a peça a fabricar [48].

Na conceção da estrutura do cárter e dos outros componentes fabricados, por fundição, teve-se em conta todas as advertências apresentadas.

### 5.3.2 Material

O material escolhido para o fabrico do cárter é o ferro fundido nodular de matriz ferrítica-perlítica, tal como sugerido por algumas referências bibliográficas e pelo Prof. Rui Neto, docente da FEUP na área de processos de fabrico [49, 50, 51].

Esta escolha baseou-se na compatibilidade do material com o processo de fabrico e nas suas características mecânicas. O ferro fundido apresenta melhores características de vazabilidade que o aço, tal como o ferro fundido nodular, relativamente ao ferro fundido cinzento, devido às seguintes propriedades [49, 50]:

- as propriedades de tração são muito bem relacionadas com a dureza Brinell, principalmente na matriz ferrítico-perlítica;
- os ferros fundidos nodulares apresentam um módulo de elasticidade constante até ao seu limite de elasticidade;
- a relação entre o limite de fadiga e a resistência à tração situa-se entre 0,33 e 0,52;
- a resistência à fadiga dos ferros fundidos nodulares torna-os altamente recomendáveis para peças críticas, utilizadas em condições de alta velocidade e esforços consideráveis;
- apresentam versatilidade sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, dispensando a introdução de elementos de liga;
- apresentam limites de carga, no estado elástico, mais elevados do que os apresentados por aços fundidos sem liga, de resistência à tração comparável. Tal facto advém dos bons limites de escoamento que apresentam;
- a ductilidade é a propriedade mais importante, e é possível chegar a valores de 20 % de alongamento, comparáveis aos obtidos em aços fundidos. Essa elevada ductilidade confere, igualmente, aos referidos materiais, razoável resistência ao choque;
- a maquinaria é muito boa, comparável à do ferro fundido cinzento;
- são os ferros fundidos mais comuns, neste tipo de aplicações e com custos de produção mais baixos.

A referência concreta do material utilizado é GGG50. É de matriz ferrítico-perlítica, com o melhor equilíbrio de propriedades mecânicas e alongamentos para a aplicação em causa e o mais utilizado em construção mecânica.

Nas Tabelas 47 e 48, são descritas as denominações e as propriedades mecânicas deste material. As propriedades indicadas, na Tabela 48, correspondem ao estado bruto de fusão.

Tabela 47: Denominações do material GGG50 [51].

| DIN   | ASTM A536 | ABNT 6916 | SAE J 434b | DIN EN 1563 |
|-------|-----------|-----------|------------|-------------|
| GGG50 | 80-55-0   | FE-50007  | D5506      | ENGJS-500-7 |

Tabela 48: Propriedades mecânicas do material [51].

| $E$ [GPa] | $\sigma_{tração}$ [MPa] | $\sigma_S$ [MPa] | $\sigma_{comp.}$ [MPa] | Impacto [J] | Dureza [HB] | Along. [%] |
|-----------|-------------------------|------------------|------------------------|-------------|-------------|------------|
| 120       | 490                     | 340              | 834                    | 5-15        | 170-220     | 7          |

### 5.3.3 Análise estrutural

A configuração final do cáster resulta de um processo iterativo, no qual o material não foi alterado. Foram realizadas as seguintes modificações e acréscimos:

- alteração da espessura do cáster para 18 mm;

Esta alteração foi efetuada para compensar a remoção de material no meio corpo superior, resultante da elaboração de um sistema de encaminhamento do lubrificante, presente nas faces deste meio corpo, para os rolamentos. Este sistema de alimentação extra dos rolamentos consiste na remoção de material, das paredes laterais e de topo, numa configuração inclinada, com uma profundidade de 2 mm, junto ao local de alojamento dos rolamentos, Figura 28. Vem de fundição, estando sujeito a um acabamento final, com recurso a uma fresa de topo tronco-cônica, para garantir menor rugosidade da superfície, e o encaminhamento de uma maior quantidade de óleo.

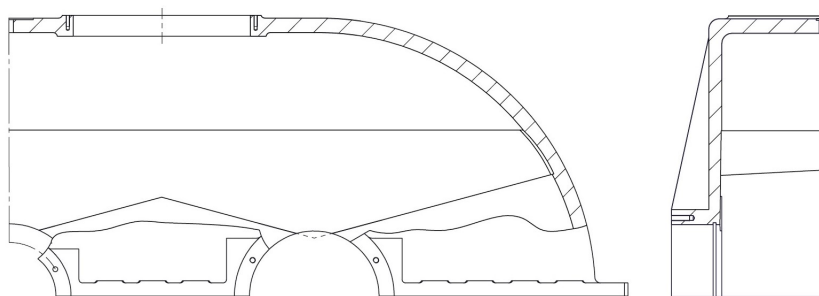


Figura 28: Representação do sistema de alimentação extra dos rolamentos [Solidworks®].

- implementação de castanhas de assento para o conjunto parafuso-porca;

Foram implementadas castanhas no local de alojamento deste conjunto, de modo reduzir a superfície a maquinar. Existem as castanhas de pequena altura, 3 mm, e as de maior altura, junto às zonas dos rolamentos, de 65 mm e 80 mm, ver Figuras 29 e 30 .

- implementação de nervuras de reforço na metade superior;

Esta foi realizada para evitar a deformação dos canhões de alojamento dos rolamentos, visto que existem forças radiais elevadas. A espessura destas é crescente, desde 16 mm, com uma saída para fundição de 2°.

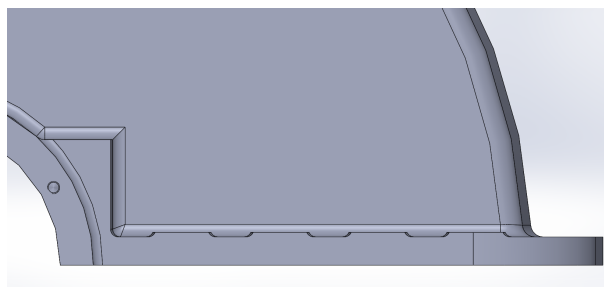


Figura 29: Representação das castanhas de assento do conjunto parafuso-porca [Solidworks®].

O número de nervuras aplicado é: duas sobre os canhões dos rolamentos auto-compensadores e uma sobre os canhões dos restantes rolamentos. Tais números são compensados com o contributo das castanhas de maior altura, que permitem aproximar o alojamento do conjunto parafuso-porca do limite do diâmetro de alojamento dos rolamentos (assegurando uma melhor fixação das metades, e um menor deslocamento vertical nesta zona crítica). Esta configuração facilita a maquinagem das castanhas e a montagem dos parafusos, em contraste com um maior número de abas distribuídas, radialmente.

A configuração destes elementos pode ser observada na Figura 30.

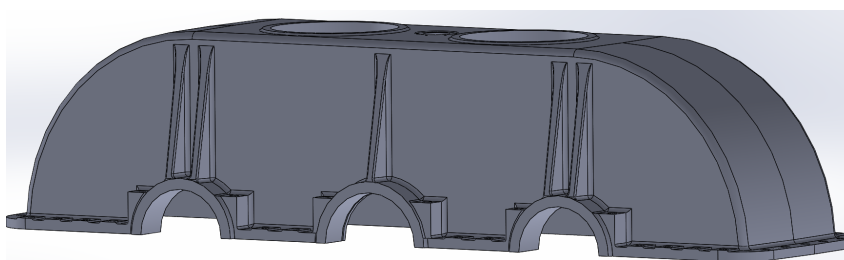


Figura 30: Representação das nervuras de reforço na metade superior [Solidworks®].

- elaboração de tampas de vigia e respetivos reforços;

Estas são elaboradas, no topo do meio corpo superior, com o intuito de controlar e verificar os engrenamentos e o estado do redutor a nível dos seus componentes internos, de modo simplificado e rápido. Os reforços foram implementados para compensar a remoção de material nessa zona, Figura 31.

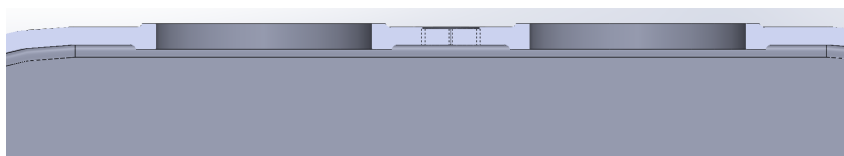


Figura 31: Representação dos reforços nas tampas de vigia na metade superior [Solidworks®].

- realização dos furos para os conjuntos parafuso-porca;

A elaboração dos furos teve como referência a obtenção de um deslocamento vertical nulo e a necessidade de implementação de alhetas entre furos, na metade inferior. As distâncias entre centros assumem valores entre 60 mm e 65 mm, consoante o troço da aba.

- aumento do comprimento e do número de alhetas, por baixo da zona dos alojamentos dos rolamentos;

Esta alteração é vantajosa a nível da dissipação de energia e de resistência neste local, visto ser o mais solicitado e afetado termicamente. A Figura 32 é elucidativa destas alterações.

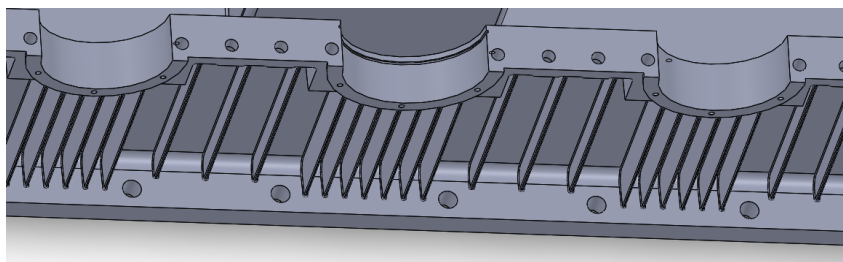


Figura 32: Representação dos furos do conjunto de parafuso-porca na aba e das alhetas na zona dos canhões [Solidworks®].

- patas de suporte e de ligação às fundações;

Estas patas assumem uma configuração em L, sendo adequadas para absorver vibrações e apresentam elevada resistência [13]. Estas permitem, também, realizar um acabamento sobre uma área inferior ao fundo do cárter, isto é, maquinagem simplesmente na face de encosto com a superfície de assentamento.

Apresentam uma altura de 45 mm e uma largura de 84 mm. Os furos dos parafusos de fixação às fundações estão localizados próximos dos diâmetros dos rolamentos e com um espaçamento de 218 mm (entre si). Estas indicações podem ser observadas nas Figuras 32 e 33.

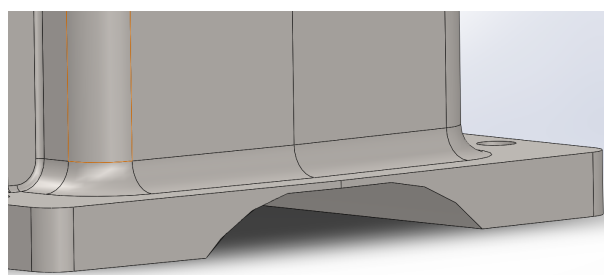


Figura 33: Representação do perfil das patas de suporte e fixação ao exterior [Solidworks®].

Recorrendo ao software *Solidworks*® realizou-se uma análise simples de elementos finitos, em cada um dos meios corpos, para identificar as zonas críticas e as modificações a implementar neles.

Nesta análise, teve-se em conta: a análise estática, as condições de fronteiras de fixação (ausência de movimento) das castanhas, na metade superior e das patas, na parte inferior e as forças distribuídas em elipse no alojamento do rolamento.

O estudo regista os campos de tensões e de deslocamentos verificados ao longo do corpo, identificando o seu valor máximo e compara-o com o valor admissível. O valor admissível para o campo das tensões é a tensão de cedência e para o campo de deslocamentos verticais é o valor arbitrado de 0,01 mm.

Nas Figuras 34, 35 e 36, estão evidenciados os campos da tensão de von Mises, o campo da tensão de corte (na direção da largura) e o campo de deslocamento vertical, respetivamente, para a metade superior.

A representação das mesmas grandezas, na metade inferior são evidenciadas nas Figuras 37, 38 e 39.

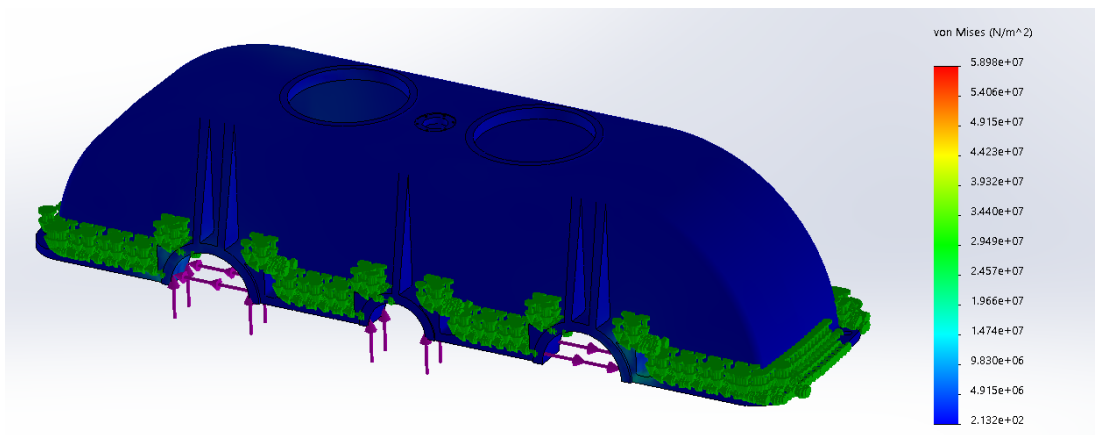


Figura 34: Campo de tensão equivalente de von Mises na metade superior [Solidworks®].

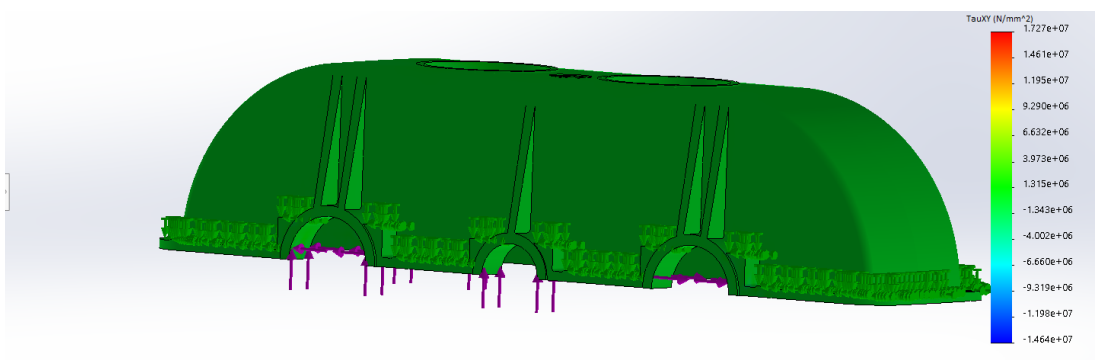


Figura 35: Campo de tensão de corte XY na metade superior [Solidworks®].

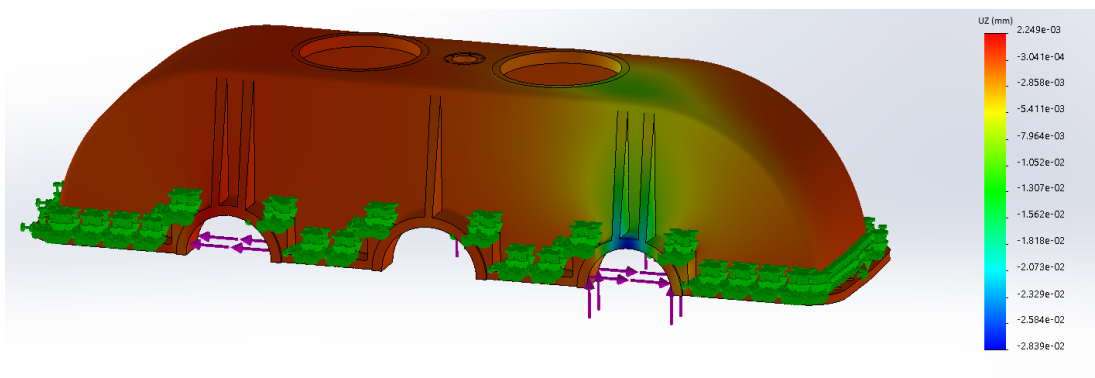


Figura 36: Campo de deslocamento vertical Z na metade superior [Solidworks®].

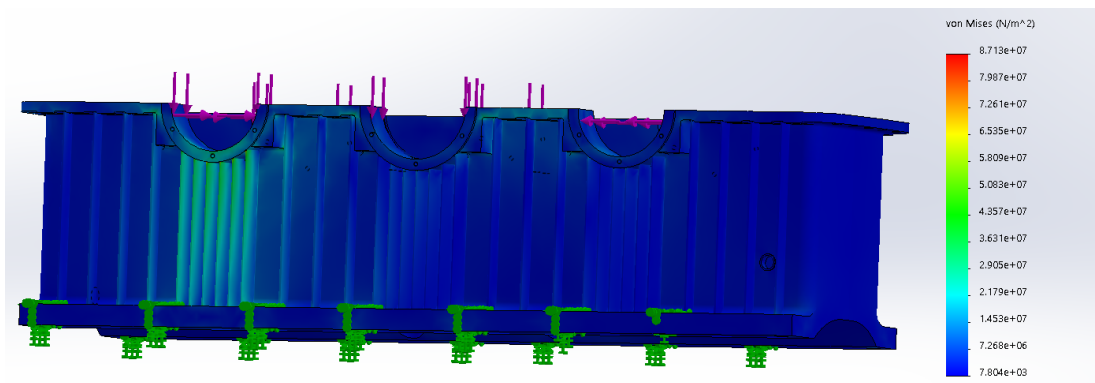


Figura 37: Campo de tensão equivalente de Von Mises na metade inferior [Solidworks®].

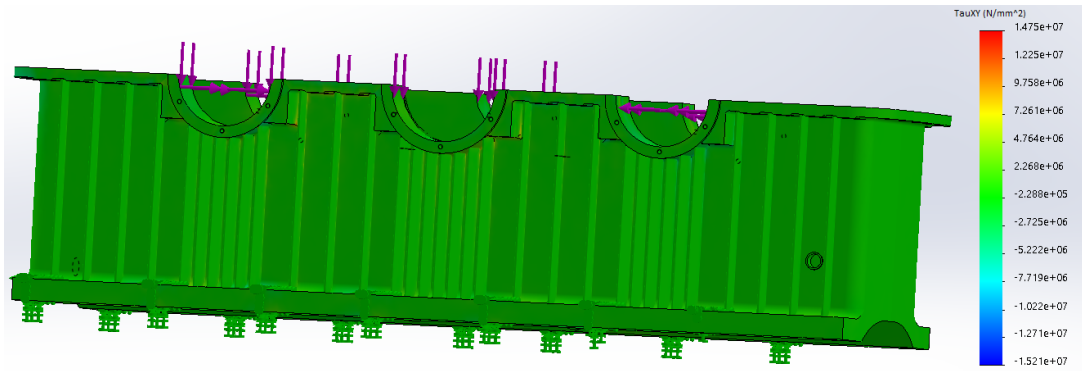


Figura 38: Campo de tensão de corte XY na metade inferior [Solidworks®].

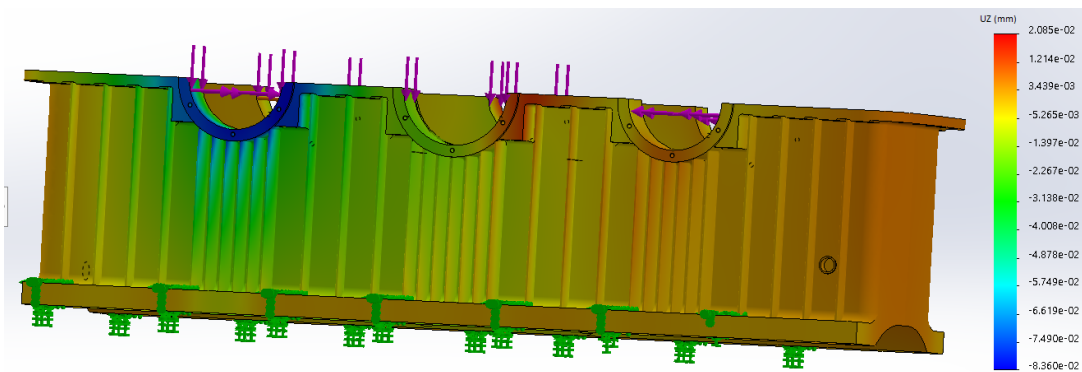
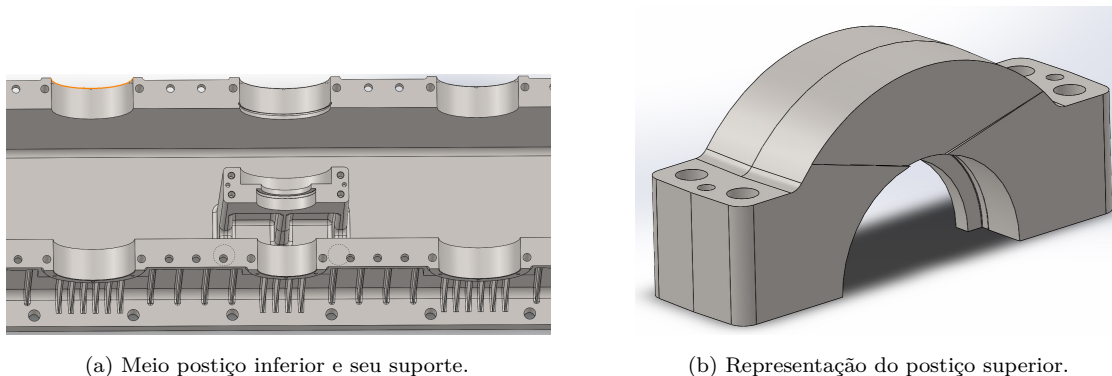


Figura 39: Campo de deslocamento vertical Z na metade inferior [Solidworks®].

## 5.4 Postiço

O postiço representa o componente de alojamento dos rolamentos mais internos dos veios de entrada e saída, sendo elaborado no mesmo material do cárter. Este componente é desmontável para facilitar a montagem e desmontagem dos correspondentes veios, juntamente com os componentes alojados. O postiço é aparafusado à outra metade, que se encontra no meio corpo inferior. A Figura 40 ilustra o mecanismo de fixação desses rolamentos, postiço propriamente dito e a metade inferior, implementado nesta conceção.



(a) Meio postiço inferior e seu suporte.

(b) Representação do postiço superior.

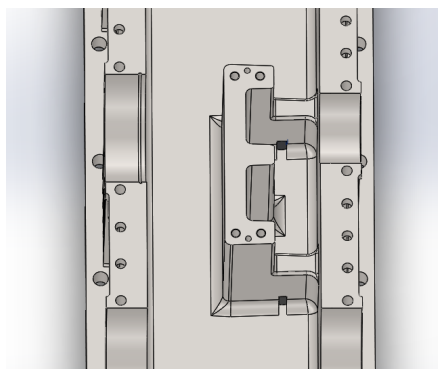
Figura 40: Configuração da estrutura suporte dos rolamentos mais internos (Rol 2 e Rol 7) implementada [Solidworks®].

O projeto destas duas partes é complexo, devido à altura considerável que o mecanismo apresenta, e à limitação dimensional e estrutural (causadas pelo diâmetro das rodas z2 e z4

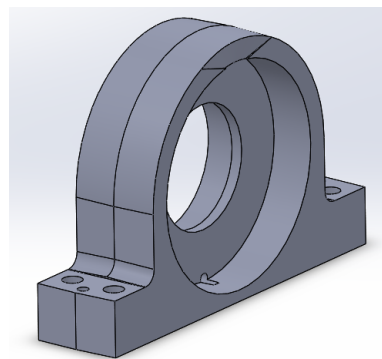


(entrada) e da roda z6 (saída)) e de possíveis reforços (nervuras) a aplicar.

De todas as configurações testadas, numa primeira fase, para este mecanismo (postigo e assento deste), a que apresenta: menores flexões, estrutura mais simples, menor risco de defeitos e de mais fácil elaboração (no processo de fundição), é a evidenciada na Figura 41. Todas as configurações realizadas com recurso a nervuras (reforços) em ambas as partes não apresentaram vantagem.



(a) Representação do assento do postigo.



(b) Representação do postigo.

Figura 41: Configuração inicial da estrutura suporte dos rolamentos mais internos (Rol 2 e Rol 7) alternativa [Solidworks®].

Esta configuração da estrutura suporte, resume-se a impor a maior altura possível à parte inferior (Figura 41a) e estabelecer uma dupla fixação à parede do cárter, para garantir a menor deformação total verificada no conjunto, e uma saliência central, para garantir que não ocorra flexão da base do postigo (na zona do rolamento de entrada).

Na elaboração da parte inferior teve-se em atenção a espessura das paredes, de modo a evitar variações elevadas com a estrutura do cárter. Aplicaram-se saídas e raios de concordância, necessários em fundição, e efetuaram-se dois orifícios (um em cada braço), garantindo assim, a circulação do lubrificante (Figura 41a).

Na conceção do postigo (Figura 41b) foi concebido um sistema de alimentação dos rolamentos (semelhante ao do carter), e uma atribuição da máxima altura possível às “patas” de fixação, com o intuito de reduzir a flexão de postigo (menor deslocamento axial).

No entanto, além desta configuração satisfazer os requisitos e apresentar características apelativas, surgiu uma outra configuração (baseada nas caixas de rolamentos), que permite: simplificar o respetivo processo de maquinagem; uma montagem mais simples; uma facilidade maior na montagem dos veios; uma redução das espessuras das paredes; etc.

Esta nova configuração (Figura 40), que foi a implementada, apresenta uma estrutura semelhante à obtida na primeira fase, tendo-se dividido o postigo inteiro em duas metades. A solução implementada, comparativamente à outra, é mais complexa de obter por fundição, devido à existência das duas cavidades entre braços. Contudo, é exequível e o maior custo de fabrico por este processo é compensado por todas as outras vantagens apresentadas.

### 5.4.1 Análise estrutural

Ambas as configurações foram sujeitas, a uma análise do campo de tensões e do campo de deslocamentos verificados nas duas partes que as constituem. O principal objetivo foi identificar o deslocamento axial máximo verificado em cada uma das partes, para se executarem alterações necessárias para a otimização das configurações.

A representação dos campos de tensão e de deslocamento axial, para a configuração inicial, é realizada nas Figuras 42 e 43. Os mesmos parâmetros são ilustrados na Figura 44, para a configuração implementada.

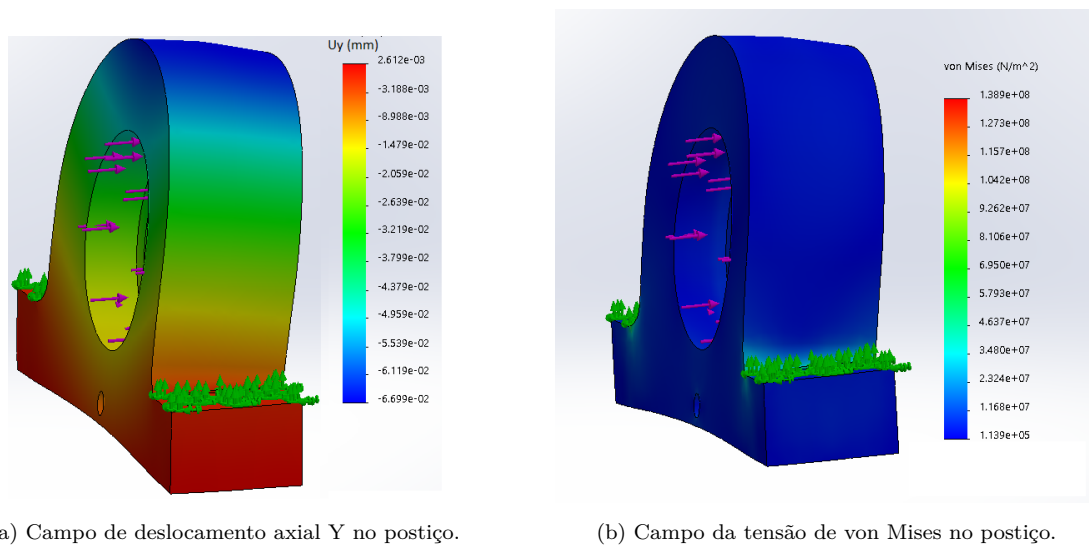
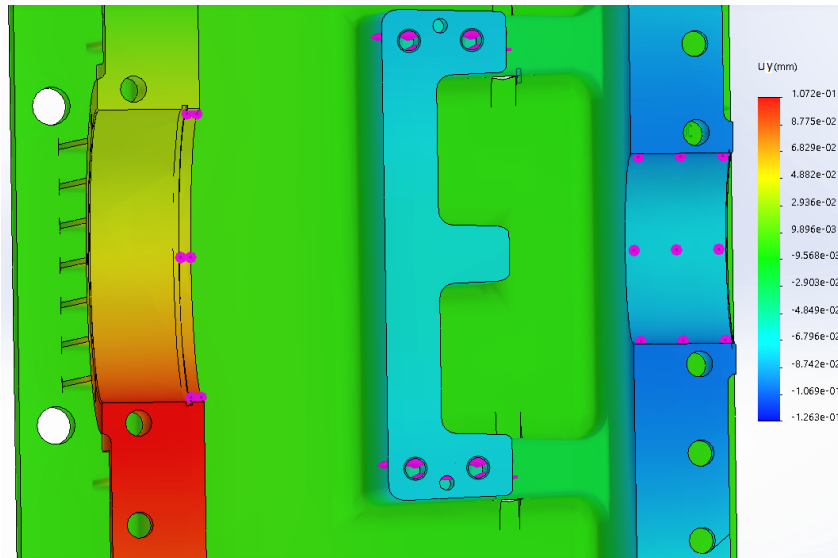


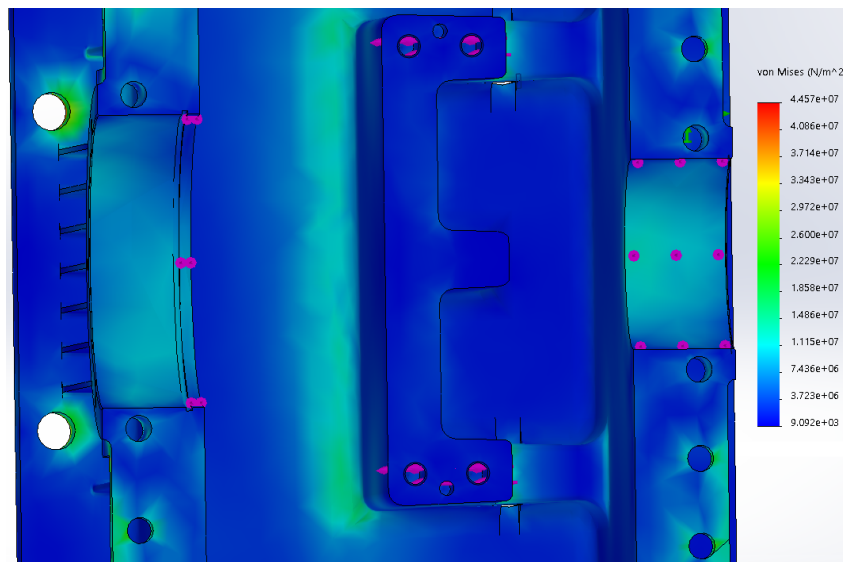
Figura 42: Representação da análise estrutural do postiço da arquitetura inicial [Solidworks®].

Para a configuração inicial, verifica-se que o deslocamento axial máximo nas zonas de interesse, em ambas as partes, ronda os 0,07 mm, pelo que, o valor total máximo ronda os 0,14 mm. Um deslocamento deste valor é muito reduzido quando comparado com a altura em causa, pelo que é admissível como solução construtiva.

A configuração implementada apresenta valores próximos dos apresentados pela anterior. No entanto, em ambas as configurações, para que o esforço axial não seja transmitido ao veio de saída ter-se-á de fracionar a “ligação” entre veios, pelo que se recorreu à montagem livre-fixo dos rolamentos do veio de saída, permitindo assim o deslocamento axial do mecanismo, sem transmissão de carga.

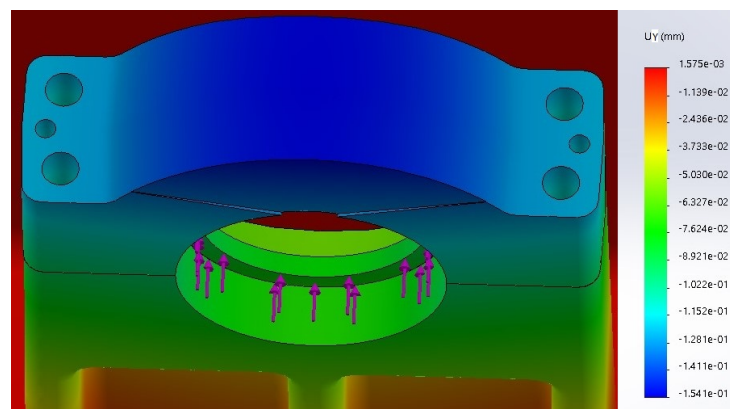


(a) Campo de deslocamento axial Y no assento do postigo.

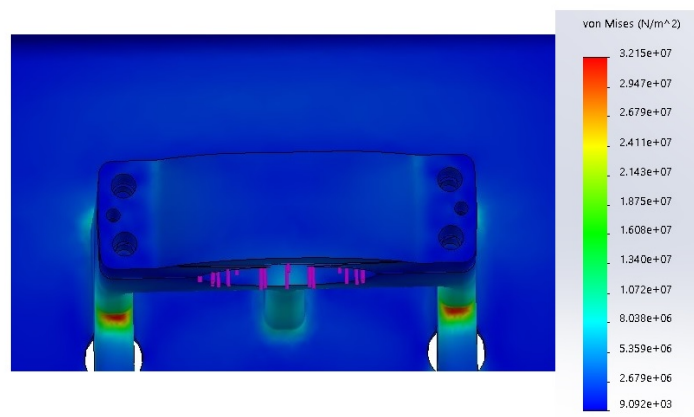


(b) Campo das tensões de von Mises no assento do postigo.

Figura 43: Representação da análise estrutural do assento do postigo da arquitetura inicial [Solidworks®].



(a) Campo de deslocamento axial Y.



(b) Campo das tensões de von Mises.

Figura 44: Representação da análise estrutural da estrutura suporte dos rolamentos mais internos (Rol 2 e Rol 7) da solução implementada [Solidworks<sup>®</sup>].

### 5.5 Tampas

Para evitar que fossem maquinadas e retificadas grandes superfícies do cárter e garantir um encosto perfeito entre este e as tampas, incluíram-se castanhas nas zonas de encosto das tampas. Recomenda-se uma altura de 0,3 da espessura do cárter, pelo que neste caso o valor seria de 5,4 mm.

Nesta conceção, foram implementadas castanhas com 6 mm de altura para compensar a largura de alguns rolamentos, evitando-se o aumento da largura do plano de apartação.

A altura das castanhas para outros elementos externos (bujão de adição, bujão de saída e indicador de nível) e tampas de respiro é de 3 mm, sendo a dimensão escolhida por conveniência.

Neste projeto, alinharam-se os rolamentos pela parede interior do cárter, adicionando-se só castanhas, na parede exterior.

Para se obter o diâmetro externo das tampas, Equação (5.27) ou (5.28), é necessário primeiro, determinar o diâmetro de centros dos alojamentos dos parafusos, Equação (5.25) ou (5.26).

$$D_p \geq D + 2,3d_p \quad (5.25)$$

ou

$$D_p \geq D + 1,5d_p \quad (5.26)$$

$$D_t \geq D_p + 1,25d_{cp} \quad (5.27)$$

ou

$$D_t \geq D_p + 3d_p \quad (5.28)$$

onde:

- $d_p$  - diâmetro do parafuso;
- $d_{cp}$  - diâmetro de cabeça do parafuso.

O diâmetro externo do canhão da tampa  $D$  é igual ao diâmetro externo do respetivo rolamento e o diâmetro interno do canhão  $D_r$  é função do diâmetro de fixação do rolamento em causa e/ou do diâmetro externo do vedante  $D_v$  alojado.

As tampas de vedação dos veios apresentam todas a mesma configuração e espessuras:  $e_{t1}$  e  $e_{t2}$ , de valores 8 mm e 10 mm, respetivamente.

Para além das tampas de vedação, existem as tampas de vigia, que apresentam a mesma configuração, mas com espessuras menores com valores de 5 mm e 7 mm, respetivamente.

A Figura 45 apresenta a representação de uma tampa genérica com todos os diâmetros e espessuras existentes nas tampas, sendo depois adaptada a nomenclatura para cada tipo de tampa. Os valores dessas dimensões estão evidenciados na Tabela 49, em milímetros.

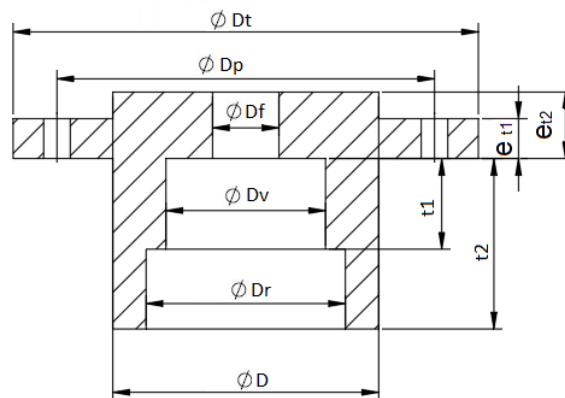


Figura 45: Representação e cotação de uma tampa genérica.

Tabela 49: Dimensões das tampas.

| Tampa           | $D$ | $D_p$ | $D_t$ | $D_f$ | $D_v$ | $D_r$ | $e_{t1}$ | $e_{t2}$ |
|-----------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|
| Entrada         | 130 | 148   | 172   | 90    | 115   | -     | 15       | -        |
| Interm. Entrada | 180 | 198   | 222   | -     | -     | 168   | -        | 19       |
| Interm. Saída   | 180 | 198   | 222   | -     | -     | 168   | -        | 8        |
| Saída           | 200 | 218   | 242   | 165   | 185   | -     | 11       | -        |
| Vigia           | 246 | 261   | 276   | 230   | 10    | -     | 8        | -        |

O processo de fabrico para as tampas é a fundição em areia. Através deste processo consegue-se uma redução da perda de material e de tempo de maquinagem, e utiliza-se um ferro fundido nodular, de gama mais baixa, GGG35. Assim, estabelece-se uma afinidade entre materiais em contacto, já que estes componentes servem de vedação e precisam de estanquidade.

O acabamento de superfície e dimensional é obtido, por maquinagem das superfícies, consoante as exigências.

As Tabelas 50 e 51 apresentam as designações e as propriedades mecânicas deste material.

Tabela 50: Designações do material GGG35 [51].

| DIN   | ASTM A536 | ABNT 6916 | SAE J 434b | DIN EN 1563  |
|-------|-----------|-----------|------------|--------------|
| GGG35 | -         | FE-38017  | -          | ENGJS-350-22 |

Tabela 51: Propriedades mecânicas do material GGG35 [51].

| $E$ [GPa] | $\sigma_{tração}$ [MPa] | $\sigma_S$ [MPa] | $\sigma_{comp.}$ [MPa] | Impato [J] | dureza [HB] | Along. [%] |
|-----------|-------------------------|------------------|------------------------|------------|-------------|------------|
| 120       | 350                     | 220              | 650                    | 25-35      | 110-150     | 22         |

5.5.1 Análise estrutural

Na presença de esforços axiais e da necessidade de estanquidade no contacto das tampas dos veios, foi realizada uma análise do mesmo género das anteriores, nestas tampas. Foram analisadas: a tampa da entrada, a tampa intermédia-entrada e a tampa intermédia-saída, já que a tampa de saída não está sujeita a esforços conhecidos.

Apenas foi considerado o pior esforço axial em cada tampa nos dois sentidos de rotação, que é o principal responsável pela deformação das tampas.

Através desta análise, focada do campo de deslocamento axial e no campo das tensões de von Mises, facilmente se verifica se o número de parafusos (distribuição angular) é suficiente e se a espessura não permite grande deformação nesta direção. Também permite verificar a resistência de cada tipo de tampa aos esforços axiais.

Os valores dos deslocamentos axiais, apresentados na Tabela 52, indicam o valor médio do deslocamento axial, na zona útil de encosto. Também são apresentados os resultados da tensão máxima de von Mises e o respetivo coeficiente de segurança.

Nas Figuras 46, 47 e 48, estão representados os campos de tensão do von Mises e de deslocamento axial em cada uma das tampas.

Tabela 52: Esforços, deslocamentos e tensões equivalente de von Mises verificadas em cada uma das tampas [Solidworks®].

| Tampa           | $\delta_y$ [ $\mu$ m] | $\delta_{adm}$ [ $\mu$ m] | $\sigma_{eq}$ [MPa] | $\sigma_S$ [MPa] | C.S. |
|-----------------|-----------------------|---------------------------|---------------------|------------------|------|
| Entrada         | 6                     | 10                        | 88                  | 220              | 2,5  |
| Interm. entrada | 9                     | 10                        | 122                 | 220              | 1,8  |
| Interm. saída   | 6                     | 10                        | 117                 | 220              | 21,9 |

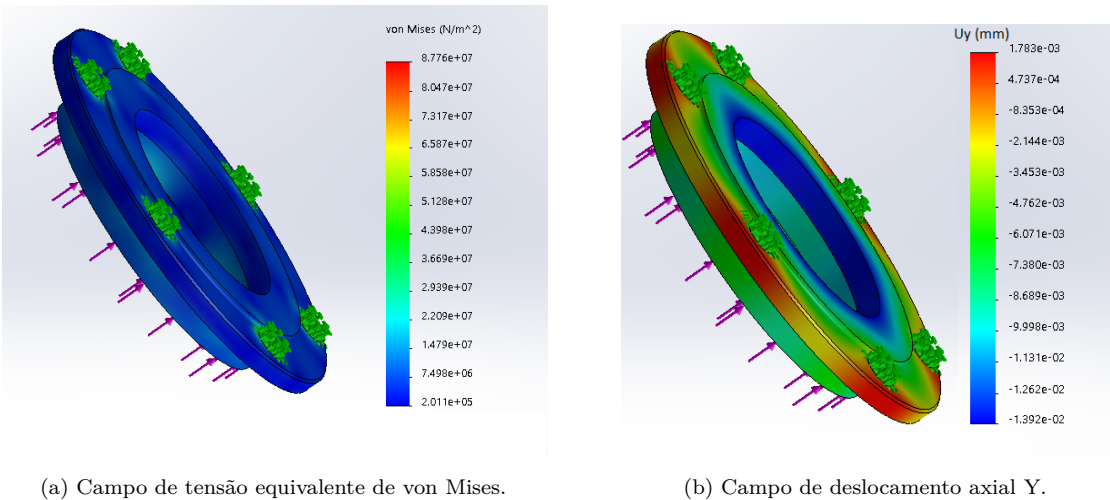


Figura 46: Representação da análise estrutural da tampa de entrada [Solidworks®].

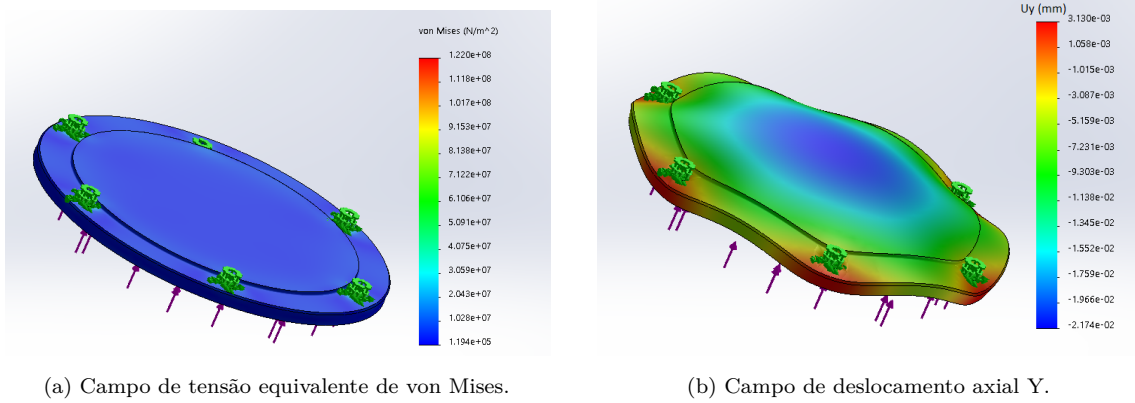


Figura 47: Representação da análise estrutural da tampa intermédia entrada [Solidworks®].

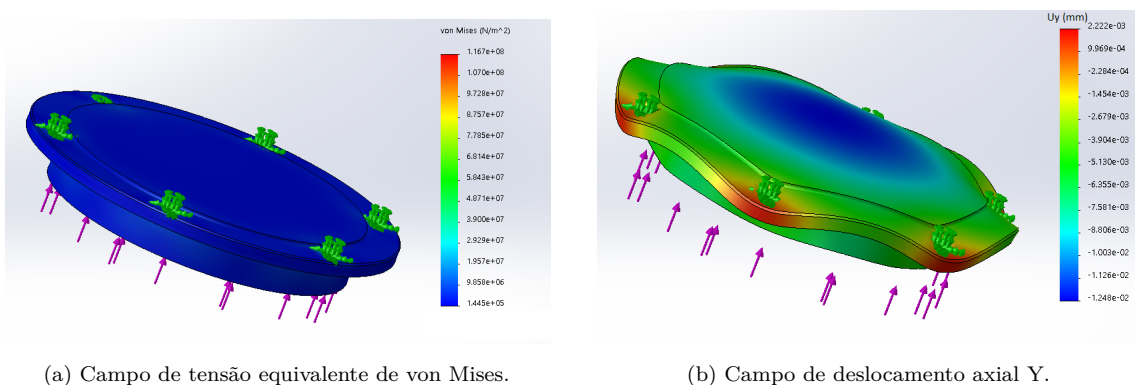


Figura 48: Representação da análise estrutural da tampa intermédia saída [Solidworks®].

## 5.6 Elementos de fixação e centragem

### 5.6.1 Parafusos

As tampas de vedação são fixadas ao cárter por intermédio de parafusos de cabeça cilíndrica com oco hexagonal, ISO 4762-M8x20-8.8, uma vez que todas elas têm a mesma espessura. Estes parafusos apresentam um diâmetro de cabeça menor, permitindo assim, conceber castanhas e tampas com um diâmetro exterior menor. A configuração da cabeça é a adequada para o aperto exercido nestas tampas.

O número de parafusos utilizados (em cada tampa) deve ser par e deve ser verificado através de um cálculo de resistência.

Os parafusos são elementos que apresentam elevada resistência à tração e uma resistência limitada ao corte.

No caso de esforços combinados (tração e corte), deve exercer-se um pré-esforço no parafuso, para criar uma força de atrito entre superfícies, de modo a contrariar o esforço de corte, diminuindo-o ou eliminando-o.

Neste projeto, os parafusos destas tampas estão sujeitos ao corte provocado pelo afastamento dos dois meios corpos e pela força axial resultante dos engrenamentos.

O cálculo do pré-esforço,  $F_A$ , (Figura 49) é realizado em função do coeficiente de atrito,  $\mu$ , en-



tre superfícies e do esforço,  $F$ , na direção perpendicular ao parafuso, segundo a Expressão (5.29):

$$F_A \cdot \mu > F \quad (5.29)$$

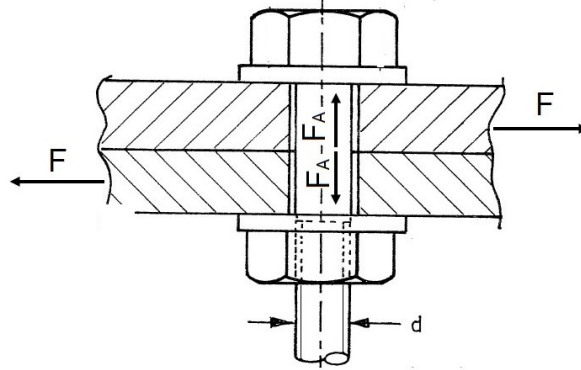


Figura 49: Representação da situação de esforço cortante numa ligação [18].

Esta-se, também, perante uma situação onde é necessário garantir estanquidade ou um deslocamento axial nulo das tampas. Perante esta situação, pode falar-se em juntas pré-esforçadas, que representam contactos entre superfícies sobre carga, as quais não podem quebrar o contacto, e que, para tal, devem ser sujeitas a uma pré-carga inicial.

No Anexo A.1 (Pág. 125), é descrito o processo de análise destas juntas pré-esforçadas, expondo-se, nesta secção, os dados mais importantes utilizados nos cálculos.

Uma vez que o afastamento dos dois meios corpos é reduzido e pode ser amortecido pela folga dos furos de passagem dos parafusos na tampa, procedeu-se a uma análise da tração dos parafusos, contabilizando o esforço axial exercido nas tampas e o pré-esforço de juntas pré-esforçadas (Figura 50). Na tampa de entrada foi, igualmente, contabilizada a pré-carga teórica a exercer nos rolamentos cónicos.

Recorrendo à Equação (5.30) obtém-se o valor do pré-esforço,  $F_i$ , a exercer.

$$F_i = \frac{k_l}{k_p} F_e \quad (5.30)$$

com:

$$k_p = \frac{A_p E}{l_p}; \quad k_l = \frac{A_l E_l}{l_l}; \quad F_e = \frac{F_a}{n_p} \quad (5.31)$$

O calculo da tensão de tração,  $\sigma_{eq}$ , é realizado recorrendo à Equação 5.32:

$$\sigma_{eq} = \frac{F_{pt}}{A_p} \quad (5.32)$$

com:

$$A_p = \frac{1}{4} \pi (d_p - 0.935 P_r)^2 \quad (5.33)$$

onde:

- $P_r$  - passo da rosca;
- $F_{pt}$  - esforço axial total no parafuso
- $F_e$  - esforço axial no parafuso;
- $F_a$  - esforço axial total;
- $A_p$  - área da secção do parafuso;
- $A_l$  - área da secção da ligação;
- $n_p$  - número de parafusos;
- $d_p$  - diâmetro do parafuso;
- $l_p$  - comprimento do parafuso na ligação;
- $l_l$  - comprimento das partes a ligar;
- $k_p$  - rigidez do parafuso;
- $k_l$  - rigidez da ligação;

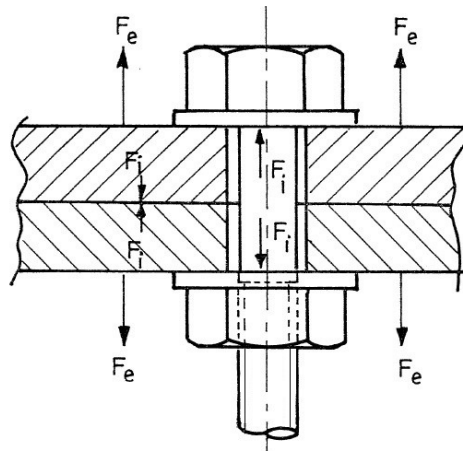


Figura 50: Representação de uma junta pré-esforçada [18].

Os valores dos esforços, das tensões equivalentes e dos coeficientes de segurança são apresentados na Tabela 53, na qual é também evidenciado o esforço axial total,  $F_t$  (resultante da soma da força axial com o pré-esforço correspondente). Tal valor de esforço axial total é superior ao verificado na realidade, como é explicado no Anexo A.1 (Pág. 125).

Os resultados indicariam um menor número de parafusos ou um menor diâmetro. No entanto, os diâmetros de localização destes são grandes, a melhor forma de garantir que as tampas não desencostam e não se deformem, é esta.

Tabela 53: Esforços, tensões e coeficientes de segurança nos parafusos das tampas de vedação [Solidworks®].

| Parafusos | $F_a$ [N] | Qt | $F_e$ [N] | $F_i$ [N] | $F_t$ [N] | $\sigma_{adm}$ [MPa] | $\sigma_{eq}$ [MPa] | C.S. |
|-----------|-----------|----|-----------|-----------|-----------|----------------------|---------------------|------|
| Entrada   | 15500     | 6  | 2593      | 2587      | 5180      | 640                  | 132,12              | 4,8  |
| Interm.   | 6179      | 6  | 1030      | 1028      | 2058      | 640                  | 52,5                | 12,2 |
| Saída     | 0         | 6  | 0         | 2589      | 2589      | 640                  | 66,03               | 9,7  |

As tampas de respiro são fixadas ao cárter através de parafusos de cabeça cilíndrica com oco hexagonal ISO 4762-M5x12-8.8, sendo aplicado por tampa, um número par de parafusos

(igual a 6). Estas tampas não apresentam esforços diretos, à exceção de eventuais esforços impostos pelas deformações do cárter. Por isso, o diâmetro e o número de parafusos, garantem que não sejam libertados vapores de lubrificante.

Os parafusos que estabelecem a união dos dois meios corpos deveriam ser dimensionados à tração e ao corte, visto estarem sujeitos a esforços combinados. No entanto, aplicando o mesmo procedimento dos parafusos das tampas de vedação, obtêm-se o pré-esforço e todos os restantes resultados que avaliam a integridade dos parafusos. Para os cálculos efetuados, dever-se-iam utilizar unicamente os esforços verticais nos apoios. No entanto, uma forma de contabilizar melhor o contributo do esforço de corte é aplicar os esforços radiais resultantes nos apoios.

Uma forma fácil de dimensionar estes parafusos e escolher a sua quantidade necessária é analisá-los à tração, considerando unicamente os parafusos na vizinhança da força radial.

A Tabela 54 indica o valor do esforço radial em cada um dos rolamentos alojados na aba do cárter, o número de parafusos, o esforço por parafuso, as tensões e respetivo coeficiente de segurança.

Tabela 54: Esforços, tensões e coeficientes de segurança no parafusos na união dos dois meios corpos [Solidworks®].

| Rolamento | $F_r$ [N] | Qt. | $F_e$ [N] | $F_i$ [N] | $F_t$ [N] | $\sigma_{eq}$ [MPa] | $\sigma_{adm}$ [MPa] | C.S. |
|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|-----------|---------------------|----------------------|------|
| Rol3      | 25160     | 6   | 4193      | 1860      | 6053      | 39                  | 640                  | 16   |
| Rol4      | 63798     | 6   | 10633     | 4716      | 15349     | 98                  | 640                  | 6    |
| Rol5      | 24307     | 6   | 4051      | 1797      | 5848      | 37                  | 640                  | 17   |
| Rol6      | 62789     | 6   | 10465     | 4642      | 15107     | 96                  | 640                  | 6    |

Pelos dados da tabela percebe-se que o número e o diâmetro destes parafusos é suficiente. Sabendo que o número de parafusos utilizados é superior ao contabilizado nos cálculos, o coeficiente de segurança mínimo não será inferior ao apresentado.

Os parafusos aplicados nesta ligação são parafusos de cabeça hexagonal ISO 4017 - M16xL - 8.8 e ISO 4014 - M16xL - 8.8, uma vez que se optou por aplicar, sempre que possível, parafusos com corpo parcialmente roscado. Devido à existência de diferentes zonas de encosto, ao longo da aba, o comprimento dos parafusos será diferente. Na Tabela 55, são apresentadas as designações dos parafusos utilizados, a sua quantidade e local de alojamento.

Tabela 55: Parafusos de fixação dos dois meios corpos do cárter [35].

| Castanhas       | Designação           | Qt. |
|-----------------|----------------------|-----|
| Entrada         | ISO 4014-M16x150-8.8 | 2   |
| Intermédias     | ISO 4017-M16x180-8.8 | 10  |
| Baixas/Aba lisa | ISO 4017-M16x60-8.8  | 36  |

Foi escolhido este tipo de parafusos, visto que a configuração da sua cabeça, contrariamente à cabeça cilíndrica com oco hexagonal, permite realizar apertos grandes (para satisfazer

a necessidade de união rígida dos meios corpos).

Em conjunto com estes parafusos, são utilizadas 48 porcas hexagonais ISO 4032 - M16 - 8.8.

Foram também utilizados parafusos de cabeça hexagonal ISO 4014-M16x100-8.8 na fixação do postigo, recorrendo, assim, ao contributo de 4 parafusos. Nesta situação, os parafusos terão de ser apertados fortemente, para estabelecer uma ligação forte e estática entre superfícies.

Os parafusos da configuração inicial do postigo, estariam sujeitos, sobretudo, ao pré-esforço e ao esforço de tração,  $F_v$ , imposto pelo momento fletor,  $M_{fP}$ , (provocado pela carga axial,  $F_a$ ). Os valores de todos estes esforços, tensões e coeficientes de segurança são apresentados na Tabela 56. Por questões de segurança, foi considerado que apenas 2 dos parafusos é que estão sujeitos ao esforço total (tração e pré-esforço).

Tabela 56: Esforços, tensões e coeficientes de segurança nos parafusos do postigo inicial [Solidworks®].

| $F_a$ [N] | $M_{fP}$ [N.m] | $F_v$ [N] | $Qt$ | $F_e$ [N] | $F_i$ [N] | $F_t$ [N] | $\sigma_{adm}$ [MPa] | $\sigma_{eq}$ [MPa] | $C.S.$ |
|-----------|----------------|-----------|------|-----------|-----------|-----------|----------------------|---------------------|--------|
| 16506     | 1815,66        | 45392     | 2    | 22696     | 21692     | 44389     | 640                  | 283                 | 2      |

A análise realizada, anteriormente, sobre os parafusos do postigo, caso a configuração inicial fosse aplicada, permite avaliar a integridade destes e ter um termo de comparação para os resultados obtidos na configuração aplicada. Nesta, contrariamente à inicial, os parafusos estão sujeitos, maioritariamente, a um esforço de corte igual ao esforço axial. Assim, a análise realizada recorreu à Equação (5.29), para calcular o valor do pré-esforço necessário. Os valores associados aos cálculos são evidenciados na Tabela 57.

Tabela 57: Esforços, tensões e coeficientes de segurança nos parafusos do postigo implementado [Solidworks®].

| $\mu$ | $F_a$ [N] | $Qt$ | $F_e = F$ [N] | $F_i = F_t = F_A$ [N] | $\sigma_{adm}$ [MPa] | $\sigma_{eq}$ [MPa] | $C.S.$ |
|-------|-----------|------|---------------|-----------------------|----------------------|---------------------|--------|
| 0,15  | 16506/2   | 4    | 2063          | 13755                 | 640                  | 87,72               | 7,3    |

Por fim, os parafusos utilizados na ligação do cárter às fundações foram parafusos M24, que tendo em vista a necessidade de exercer um binário razoável de aperto, deverão ser também de cabeça hexagonal, ISO 4014-M24x80-8.8, sendo necessários 16 parafusos, de modo a garantir uma boa fixação.

Em síntese, apresenta-se na Tabela 58 a lista dos parafusos necessários, assim como a respetiva quantidade.

Tabela 58: Lista de todos os parafusos necessários para o projeto e respetiva quantidade [36].

| <b>Designação</b>    | <b>Qt.</b> |
|----------------------|------------|
| ISO 4762-M8x20-8.8   | 36         |
| ISO 4762-M5x12-8.8   | 12         |
| ISO 4017-M16x180-8.8 | 10         |
| ISO 4014-M16x150-8.8 | 2          |
| ISO 4017-M16x60-8.8  | 36         |
| ISO 4014-M16x100-8.8 | 4          |

### 5.6.2 Pinos de centragem

Para garantir um posicionamento relativo preciso, entre componentes, recorreu-se a pinos. Estes foram aplicados no posicionamento relativo dos dois meios corpos do cárter e do postiço em relação ao respetivo assento. A sua colocação deve ser feita em faces opostas e de forma desalinhada.

Os pinos escolhidos para ambos os posicionamentos são pinos elásticos. Adequam-se a este fim e exigem, simplesmente, um furo com tolerância H12, obtido por furação, sem mandrilagem.

A Tabela 59, apresenta a informação sobre os pinos utilizados em cada uma das aplicações.

Tabela 59: Caraterização dos pinos [35].

| <b>Posicionamento</b> | <b>Designação</b>      | <b>Qt.</b> |
|-----------------------|------------------------|------------|
| Cárter                | EN ISO 8752-10x35-St   | 2          |
| Postiço               | EN ISO 8752-10x90-A-St | 2          |

### 5.6.3 Anéis elásticos

Para realizar a montagem com posicionamento axial livre-fixo dos rolamentos no veio de saída (rolamento da extremidade de acoplamento fixo e o rolamento da extremidade do postiço livre), recorreu-se à utilização de anéis elásticos.

A fixação axial veio-rolamento e rolamento-cárter poderia ser realizada de diversas maneiras. Contudo, como não existe esforço axial no engrenamento de saída (à exceção de um esforço externo de acoplamento do veio de saída e de um esforço de atrito na flexão do postiço), os anéis não estão sujeitos a carga. As vibrações não são transmitidas ao veio de saída, pois a roda como é de dentado helicoidal duplo, não apresenta elementos de fixação, podendo-se deslocar sobre o veio, tornando os anéis elásticos adequados para esta fixação.

Foram assim, implementados dois tipos de anéis elásticos (um no veio e outro nas caixas de alojamento dos rolamentos (ver Figura 51)). As suas dimensões e designações são contempladas

na Tabela 60.

Tabela 60: Identificação e caraterização dos anéis elásticos utilizados [52].

| Local  | Tipo | Designação       | $d$ [mm] | $b_a$ [mm] | $s$ [mm] | $d_3$ [mm] | $d_2$ [mm] | $m$ [mm] |
|--------|------|------------------|----------|------------|----------|------------|------------|----------|
| Rol. 7 | Veio | DIN 471-160x4-St | 160      | 12,2       | 4        | 151        | 155        | 4,15     |
| Rol. 8 | Veio | DIN 471-160x4-St | 160      | 12,2       | 4        | 151        | 155        | 4,15     |
| Cárter | Furo | DIN 472-200x4-St | 200      | 14         | 4        | 209,5      | 205        | 4,15     |

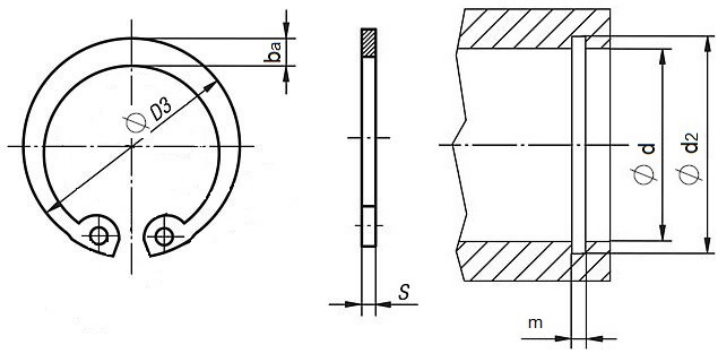
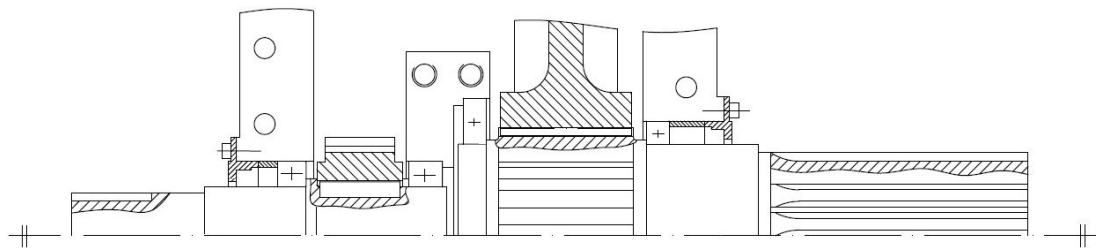
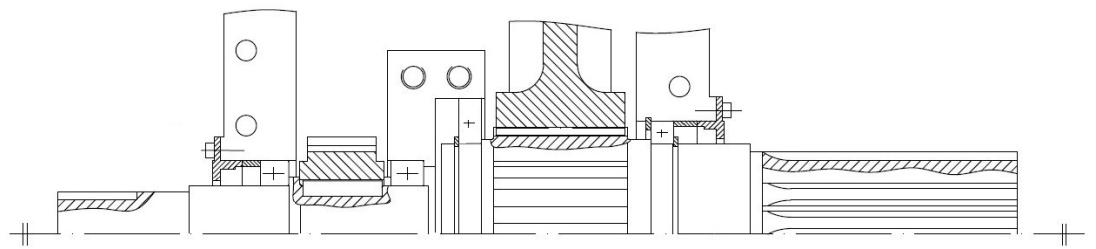


Figura 51: Representação de um anel elástico para furo.

Na Figura 52, apresentam-se a passagem de uma montagem axial fixa-fixa para os rolamentos (situação de transmissão de carga axial do veio de entrada) para a montagem implementada.



(a) Montagem inicial (com transmissão de carga).



(b) Montagem implementada (sem transmissão de carga.)

Figura 52: Representação esquemática da fixação dos rolamentos no veio de saída.

### 5.7 Casquilhos espaçadores

Estes elementos, utilizados nesta conceção em vários locais, tiveram como função fixar e posicionar axialmente os vários componentes entre si. Nos veios de entrada e de saída foram montados entre a tampa de vedação e o anel exterior do rolamento, e nos veios de entrada e intermédios, entre o cubo da engrenagem e o anel interior do rolamento.

Na Tabela 61, são enunciadas as dimensões dos casquilhos espaçadores e o seu respetivo local de montagem. A representação destes é realizada na Figura 53.

Os espaçadores são em aço, St52 (fornecido em tubo), a partir do qual são cortados tramos, que serão maquinados para as dimensões finais. As propriedades mecânicas deste material estão evidenciadas na Tabela 62.

Tabela 61: Local, denominação e dimensões dos casquilhos espaçadores aplicados.

| Local      | Denominação          | $d$ [mm] | $D$ [mm] | $b$ [mm] | Qt. |
|------------|----------------------|----------|----------|----------|-----|
| Entrada    | Espaçador entrada    | 120      | 130      | 23,8     | 1   |
| Saída      | Espaçador saída      | 1 90     | 200      | 26       | 1   |
| Pinhão Z1  | Espaçador roda Z1    | 85       | 100      | 6,5      | 1   |
| Roda Z2/Z4 | Espaçador intermédio | 120      | 135      | 7,15     | 2   |

Tabela 62: Designações e propriedades mecânicas do aço St52 [23].

| Ramada | DIN       | EN          | $\sigma_S$ [MPa] | $\sigma_B$ [MPa] | $E$ [GPa] |
|--------|-----------|-------------|------------------|------------------|-----------|
| St52   | St 52-3 U | S 355 J0/J2 | $\geq 355$       | 470 – 630        | 200       |

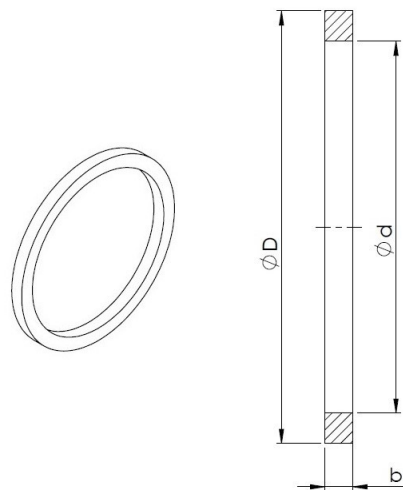


Figura 53: Representação esquemática e 3D de um casquilho espaçador, com a respetivas cotas.

## 5.8 Chanfros, raios de concordância e ranhuras

As arestas vivas, que surgem nas transições de diâmetro e nos topos dos elementos, devem ser eliminadas, para excluir zonas cortantes e facilitar a montagem dos vários elementos.

Os chanfros a efetuar nos veios e cubos das rodas dentadas deveriam apresentar um valor de 0,1 do correspondente diâmetro. Tal indicação, leva a elevados valores que comprometeriam os escateis das chavetas, nas rodas dentadas, e o comprimento reduzido dos veios. Esta indicação não pode ser seguida criteriosamente, visto que estes elementos nesta conceção apresentam diâmetros elevados. Assim, o valor máximo aplicado é de 5 mm, e os chanfros de 1 mm para grandes diâmetros funcionam como quebra aresta, uma vez que não apresentam caráter funcional em ligações.

Deste modo são realizados chanfros a  $45^\circ$  de profundidade: 2 mm, nos topos dos veios (Figura 55 A); 1 mm, no diâmetro externo do cubo das engrenagens e do estriado; 3 mm e 5 mm, nas rodas ( $z2/z4$ ); 1 mm e 3 mm, no pinhão  $z1$ ; 1 mm, nos  $D_t$  e  $D_v$  das tampas; 1 mm, nos canhões de alojamento dos rolamentos, 1 mm, nas restantes transições dos veios (Figura 55 B); etc.

Os valores dos raios de concordância de maquinagem implementados nos vários componentes foram estabelecidos de acordo a norma DIN 250, que remete para as séries Renard, R5 e R10. Os raios mais vezes aplicados foram os 1 mm e 0,5 mm, nas transições diametrais dos veios e tampas, Figura 55 E e F. Os seus valores são meramente indicativos da necessidade da sua existência, pois estes dependem das características das ferramentas utilizadas (diâmetro da ponta da pastilha) que, por sua vez, dependem do material a maquinar e do processo de maquinagem aplicado em cada empresa (a conceção é ajustada para a capacidade de produção da empresa).

Uma outra alteração realizada nos veios foram as ranhuras de desafogo (Figura 54 e 55 D). Este processo elimina o raio de concordância que a ferramenta deixa no processo de maquinagem, na transição do diâmetro. Como as superfícies de alojamento do rolamento precisa de ser retificada, a existência destas ranhuras, permite a saída da mó sobre essa transição de diâmetros (diâmetro da zona de alojamento do rolamento e diâmetro de encosto do rolamento).

A Figura 54 apresenta a configuração da alteração do diâmetro do veio e da caixa, sendo indicados os valores das respetivas dimensões, na Tabela 64. As ranhuras realizadas nos vários veios são do tipo A6, que apresenta as mesmas dimensões e configuração, visto que, os diâmetros dos veios e das caixas, pertencem ao mesmo intervalo. Os dados foram retirados da norma ISO 18388:2016.

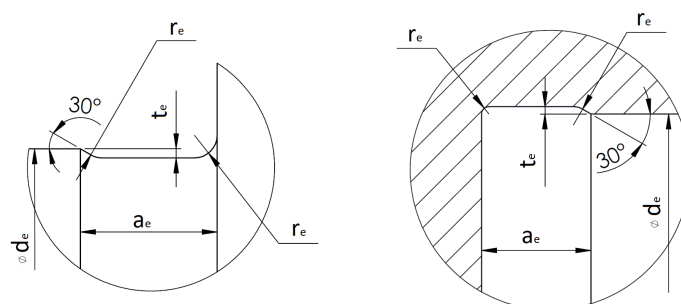


Figura 54: Representação do desafogo com forma A realizado nos veios e caixas [ISO 18388:2016].



Tabela 63: Identificação da forma de desafo [adaptada da norma ISO 18388:2016].

| $d_e < 80 \text{ mm}$ |       |          |           |
|-----------------------|-------|----------|-----------|
| Forma                 | $r_e$ | $r_{21}$ | $h_{min}$ |
| A1 x 0,1              |       |          |           |
| A2 x 0,2              |       |          |           |
| A4 x 0,3              |       |          |           |
| A 6x 0,4              | 1     | -        | -         |

Tabela 64: Dimensões do desafo a aplicar [adaptada da norma ISO 18388:2016].

| Designação | $a_e$ [mm] | $r_e$ [mm] | $t_e$ [mm] | $t_{e\text{tol}}$ [mm] |
|------------|------------|------------|------------|------------------------|
| A6 x 0,4   | 6          | 1          | 0,4        | +0,1                   |

A incompatibilidade das tolerâncias dimensionais previstas para o veio, tendo em conta o indicado para a roda dentada e para o rolamento, conduziram à existência de uma variação de diâmetro entre as superfícies dos alojamentos de cada um dos componentes em causa (Figura 55 C), facilitando a montagem da roda dentada e a ausência de danos, na superfície de alojamento dos rolamentos. Caso esta alteração não ocorresse, ter-se-ia de recorrer ao aquecimento considerável da roda dentada e à sua montagem sobre pressão. Esta alteração foi praticada nos veios intermédios e no veio de entrada, que sofrem uma redução de 1 mm no seu diâmetro, a partir de uma cota que se encontra debaixo do correspondente espaçador.

A incompatibilidade das tolerâncias diametraís do vedante e do rolamento, no veio de entrada, obriga à realização de um rebaixo local no veio, a fim de criar uma quebra na superfície. Permite assim, realizar diferentes acabamentos, nas superfícies inerentes a cada componente. O rebaixo local foi realizado com um comprimento de 5 mm, uma profundidade de 0,5 mm e raios de concordância de 0,5 mm.

A Figura 55 representa as variações de diâmetro criadas e os rebaixos locais realizados.

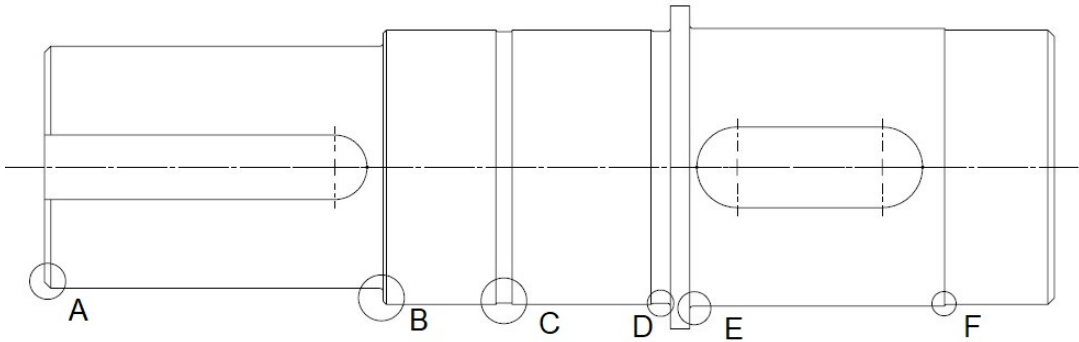


Figura 55: Representação do veio de entrada e do tipo de modificações realiza.

## 5.9 Outros elementos

Existem outros elementos, não menos importantes, que permitem equipar o redutor com características particulares, delimitar as fronteiras entre o interior e o exterior e realizar a manutenção e controlo deste.

### 5.9.1 Bujões

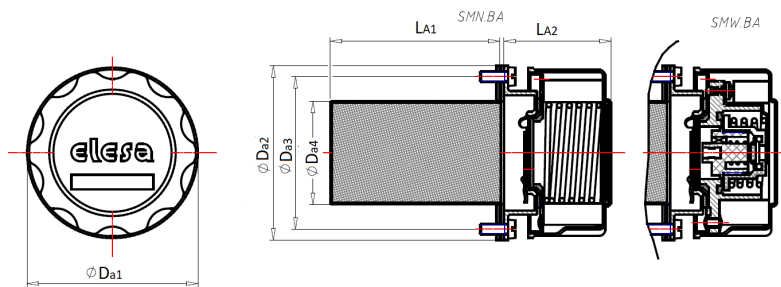
Estes elementos permitem realizar a adição e a remoção do lubrificante, bem como a verificação do seu nível.

O elemento de adição de lubrificante escolhido, Figura 56, é dotado de: um diâmetro que permite a fácil introdução do lubrificante; um sistema de respiro que permite a libertação de gases e um sistema de filtragem do lubrificante adicionado. Este sistema de filtragem não se relaciona com o funcionamento do redutor, mas permite reter partículas e impurezas, em situações de reposição do mesmo óleo no cárter, já que a lubrificação é realizada por chapinagem.

O elemento é fornecido pela empresa *ELESA*<sup>®</sup>, com a designação SMW 80-BA-F40-350mb. As dimensões mais importantes são evidenciadas na Tabela 65.



(a) Configuração e constituição do bujão.



(b) Representação esquemática com cotas.

Figura 56: Bujão de adição [53].

Tabela 65: Dimensões das varias secções do bujão de adição [53].

| $D_{a1}$ [mm] | $D_{a2}$ [mm] | $D_{a3}$ [mm] | $D_{a4}$ [mm] | $L_{A1}$ [mm] | $L_{A2}$ [mm] | Peso (kg) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| 81            | 72            | 83            | M49           | 55            | 80            | 0,41      |

O bujão de saída foi escolhido em função da quantidade de lubrificante e do tempo de escoamento. Perante uma quantidade considerável de lubrificante e um tempo baixo de escoamento, o bujão aplicado é o GN 749-M33x2-A da *ELESA*<sup>®</sup>. Este elemento é feito em aço zincado (classe 5.8), em alternativa aos materiais poliméricos, que para esta aplicação, não seriam adequados.

A representação deste elemento é ilustrada na Figura 57 e os dados dimensionais estão indicados na Tabela 66.

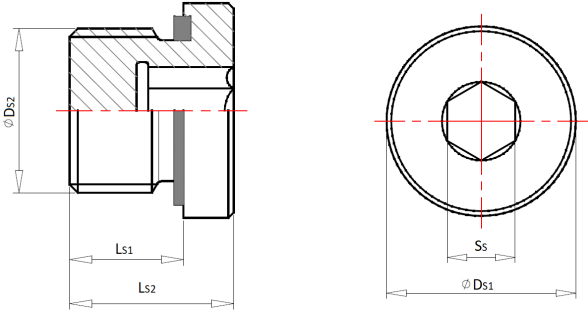


Figura 57: Representação esquemática com cotas do bujão de saída [53].

Tabela 66: Dimensões das varias secções do bujão de saída [53].

| $S_s$ [mm] | $D_{s1}$ [mm] | $D_{s2}$ [mm] | $L_{s1}$ [mm] | $L_{s2}$ [mm] | Peso (kg) |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| 17         | 40            | M33           | 16            | 22,5          | 0,125     |

O indicador de nível selecionado é o GN 743.1-18-M26x1,5-AS, em alumínio, que apresenta uma dimensão razoável para um fácil controlo do nível de lubrificante do cárter.

Foram aplicados dois indicadores de nível, um numa face de topo, e outro na face do veio de saída, com o objetivo de garantir a verificação do nível de lubrificante (se um deles estiver inacessível), e verificar o nível ao longo do comprimento do cárter (dado o seu elevado valor).

Este elemento está representado na Figura 58 e a apresentação das suas dimensões características na Tabela 67.

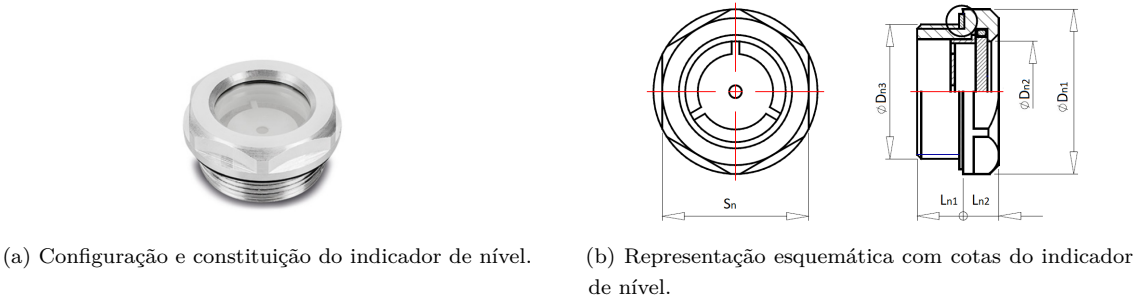


Figura 58: Indicador de nível [53].

Tabela 67: Dimensões das varias secções do indicador de nível [53].

| $S_n$ [mm] | $D_{n1}$ [mm] | $D_{n2}$ [mm] | $D_{n3}$ [mm] | $L_{n1}$ [mm] | $L_{n2}$ [mm] | Peso (kg) |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| 30         | 32            | 18            | M36           | 9             | 8             | 0,018     |

O último elemento deste género é o tampão dos orifícios, realizados nos braços do assento do postigo, que apresentam dimensões que permitem perfurar os braços.

Estes tampões têm a mesma configuração e material do bujão de saída, com dimensões superiores, apresentadas na Tabela 68. A sua designação é GN 749-M48x2-A.

Tabela 68: Dimensões das varias secções do tampão de orifícios [53].

| $S_s$ [mm] | $D_{s1}$ [mm] | $D_{s2}$ [mm] | $L_{s1}$ [mm] | $L_{s2}$ [mm] | Peso (kg) |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| 24         | 55            | M48           | 16            | 22,5          | 0,254     |

### 5.9.2 Retentores

Para os veios de entrada e saída (devido à ligação com mecanismos externos), tem de se estabelecer uma restrição à fuga de óleo e à entrada de partículas. Consultando o catálogo da *Freudenberg Sealing Technologies*<sup>®</sup>, considerando o diâmetro do veio  $d_v$  e diâmetro interno do canhão  $D_r$ , escolheu-se o retentor (anel de vedação) que melhor se ajusta aos requisitos pretendidos.

Na Figura 59, apresenta-se a representação simplificada, e as dimensões do retentor e do seu local de alojamento. Na Tabela 69 são apresentados os valores dessas dimensões, a denominação dos retentores e a indicação da respetiva zona de alojamento.

Na escolha dos retentores, teve-se em conta a particularidade de estes possuírem raspador (que lhes confere uma maior capacidade de resistência à entrada de partículas) e um diâmetro externo do retentor inferior ou igual, ao atribuído ao diâmetro interno do canhão ou espaçador, que encosta no anel externo do rolamento [54].

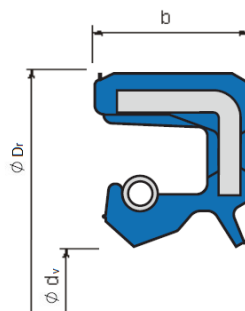


Figura 59: Esquema e dimensões do retentor e respetivo local de alojamento [54].

Tabela 69: Denominação e dimensões dos vedantes [54].

| Local   | Designação                       | $d_v$ [mm] | $D_r$ [mm] | $b$ [mm] |
|---------|----------------------------------|------------|------------|----------|
| Entrada | BAUSLX2 - 85 x 110 x 12 (470376) | 85         | 110        | 12       |
| Saída   | BASL - 160 x 190 x 15 (122255)   | 160        | 190        | 15       |

Ambos os retentores são do mesmo material, 72 NBR 902, e apresentam a mesma temperatura admissível de funcionamento, de 100 °C. Este valor é suficiente para a aplicação em causa, visto que a temperatura real dos retentores não supera os 80 °C (temperatura dos rolamentos).

## 6 Desenhos

Neste Capítulo dá-se uma explicação sobre os desenhos realizados, bem como o toleranciamento aplicado a cada componente.

### 6.1 Desenhos de definição e de conjunto

Após o dimensionamentos dos componentes e apresentação das suas características, realizou-se a segunda parte do projeto em desenvolvimento, com a elaboração dos desenhos.

Começou-se por realizar-se um desenho de conjunto do redutor e, de seguida, elaboraram-se os desenhos de definição de cada um dos componentes não normalizados do redutor, que engloba as rodas dentadas, os veios, as tampas, os dois meios corpos, o postigo e os casquilhos espaçadores. Este trabalho decorreu num processo iterativo, tendo-se estabelecido um relação entre estes dois tipos de desenhos, de modo a conceber a melhor estrutura do redutor e a sua respetiva montagem, assim como a estabelecer uma correta cotação dos diferentes componentes.

Por fim, realizou-se um desenho de conjunto em vista explodida, de modo a expor a constituição do redutor, segundo uma vertente 3D, e servir como orientação para a sua montagem e posteriores operações de manutenção.

Os desenhos encontram-se todos no Anexo E (Pág. 279). Mais em concreto, os desenhos de definição estão no Anexo E.2 (Pág. 281), o desenho de conjunto no Anexo E.1 (Pág. 279) e o desenho de vista explodida no Anexo E.3 (Pág. 301).

### 6.2 Toleranciamentos

Os vários componentes do redutor de velocidade concebido têm configurações nominais caracterizadas por cotas nominais. Visto que não existem cotas exatas nem superfícies perfeitas, associam-se a esses componentes desvios, que são contabilizados nos toleranciamentos dimensional e geométrico.

Deste modo, é necessário definir não só os valores das cotas nominais, como também os seus desvios. Para os componentes normalizados (rolamentos, anéis elásticos, chavetas e retentores) esses valores são indicados pelos respetivos fabricantes ou pelas normas correspondentes que os dimensionam. Para os restantes elementos, os valores nominais são ditados pelas necessidades e o toleranciamento é obtido recorrendo a normas, a informações bibliográficas e a indicações práticas.

Este tópico torna-se muito importante num projeto de conceção, pois o objetivo é a obtenção de peças com dimensões, dentro das tolerâncias definidas, garantindo-se assim, a montagem dos componentes sem a necessidade de fazer diferentes ajustes, de equipamento para equipamento, salvo algumas exceções.

O método de repartição de tolerâncias utilizado foi o Método dos extremos, também designado como o Método do pior dos casos ou Método aritmético. Neste método, os valores limites da cota condição (por exemplo uma folga, um aperto, uma cota total de montagem, etc) apenas se registarão se as cotas  $a_i$ , de todos os componentes individuais, se situarem nos limites inferiores

ou superiores dos seus respectivos intervalos de tolerância. A única hipótese admitida é a de que as cotas de todas as peças estão dentro dos seus intervalos de tolerância. Deste modo, as características da montagem continuarão a ser asseguradas.

A maior desvantagem deste método surge quando a cadeia de cotas tem muitos componentes, ou a tolerância da cota condição funcional é pequena, pois dá origem a tolerâncias pequenas que apresentam custos elevados. É, por isso, aconselhável muitas vezes a utilização de uma abordagem estatística.

O toleranciamento estatístico é baseado em certos princípios estatísticos, utilizados no estabelecimento de tolerâncias em sistemas e componentes produzidos, em grandes séries. Utiliza as distribuições estatísticas das cotas  $a_i$  relevantes dos componentes, para determinar a tolerância da cota condição  $T_a$ , do conjunto montado. Neste processo, pode existir uma conjugação de cotas, através de um limite inferior de uma peça com o máximo de outra, digamos que não ocorre um somatório de cotas limites, mas sim um agrupamento de máximos e mínimos.

Este método, como envolve um conhecimento mais aprofundado sobre os componentes e as tendências dos desvios destes, não foi adotado, optando-se pelo anterior, mesmo sabendo que apenas garante que a soma de cotas se encontra dentro dos limites definidos.

Nos desenhos de definição apresentados no Anexo E.2 (Pág. 281), é efetuada uma cotagem funcional dos componentes. Para o processo de fabrico, muitas destas cotas devem ser exportadas para uma cotagem de fabricação, tendo em consideração as capacidades de fabricação de cada centro de maquinagem. Por vezes, existe a necessidade de ajustar ou modificar as cotas funcionais, para se obterem as cotas de fabricação atingíveis.

Na análise dos vários componentes, realizada de seguida, a cotagem de distâncias lineares (comprimento de um casquilho e do canhão de uma tampa, por exemplo), é realizada recorrendo a uma cota teoricamente exata e uma tolerância geométrica de localização, substituindo o toleranciamento dimensional (só deve ser aplicado em tamanhos, por exemplo em diâmetro de furos). Tal cotagem permite contabilizar os desvios geométricos e referenciar as superfícies para controlo.

O valor da rugosidade das superfícies vai ser atribuído segundo diferentes indicações, consoante o componente em análise. No entanto, este pode ser obtido em função do toleranciamento dimensional, assumindo-se a rugosidade média aritmética como  $Ra \approx 1/30$  do IT da tolerância, ou em função do toleranciamento geométrico, assumindo-se como  $Ra \approx 1/10$  da tolerância geométrica de forma, aplicada nessa superfície.

### 6.2.1 Engrenagens

O toleranciamento aplicado nas engrenagens foi baseado na norma DIN 3966:1978 e no relatório técnico ISO/TR 10064-3, em desenhos de engrenagens da Renault de Cacia e em referências bibliográficas.

Com o cruzamento da informação e o conhecimento da dependência das categorias das tolerâncias geométricas, realizou-se o toleranciamento mais adequado.

O toleranciamento geométrico de localização aplicado foi ajustado ao projeto em desenvolvimento, em função das necessidades construtivas e de montagem.

A Renault considera uma tolerância de localização de 0,2 mm para a largura de dentado, a qual se adequa a este projeto, pois mantém a largura do dentado próxima da nominal, conduzindo a que razão de condução  $\epsilon_\beta$  se mantenha unitária, ou muito próxima da unidade.

O restante toleranciamento geométrico é obtido em função de parâmetros de toleranciamento dos dentes da respetiva engrenagem (qualidade do dentado; desvio total do passo,  $F_p$ ; desvios total da linha dos flancos,  $F_\beta$ ) e de valores dimensionais (largura da roda,  $b_2$  e do dentado,  $b$  e diâmetro primitivo,  $d_p$  de cada roda dentada), como indica o relatório técnico ISO/TR 10064-3.

Os valores destes parâmetros devem ser obtidos pela norma ISO 1328-1:2013 [55]. No entanto, o software só apresenta as normas ISO 1328-1:1995 e a DIN 3961:1978, tendo esta última sido retirada do mercado recentemente, visto que o comité alemão (DIN) adotou a versão recente da ISO. Perante esta situação, e reconhecendo-se que não se deve aplicar valores de uma norma DIN numa ISO, optou-se pela norma DIN, que apresenta valores mais conservadores que a ISO de 1995, e a sua saída do mercado é ainda recente.

Nas Figuras 60 e 61, abordam-se de forma geral, o toleranciamento aplicado a uma roda dentada e a um veio pinhão. Para completar essa análise genérica, na Tabela 70 apresentam-se as expressões de cálculo para as várias tolerâncias geométricas, segundo o relatório técnico ISO/TR 10064-3 [56, 57].

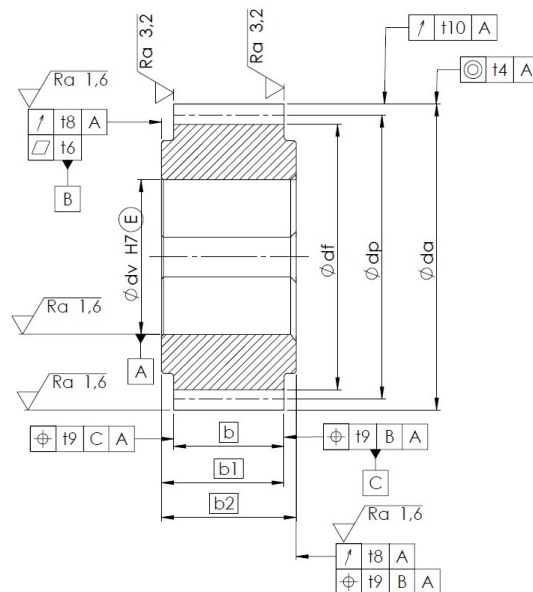


Figura 60: Cotação e toleranciamento aplicados a uma roda dentada genérica [56].

A tolerância dimensional do diâmetro interno do cubo das rodas dentadas  $z1$ ,  $z3$  e  $z4$  é da classe H7, conjugada com a do veio de classe m6. Este toleranciamento resulta do facto da velocidade de rotação do conjunto (veio e roda dentada) ser superior a 200 rpm e a transmissão de potência poder ser realizada por intermédio de uma chaveta.

O toleranciamento aplicado leva a um ajustamento fortemente preso, o qual também é um ajuste incerto cuidado que apresenta interferência (folga média negativa). A montagem e a desmontagem das engrenagens deve ser realizada recorrendo a um mecanismo de pressão, sem que ocorra deterioração dos componentes [52, 58].

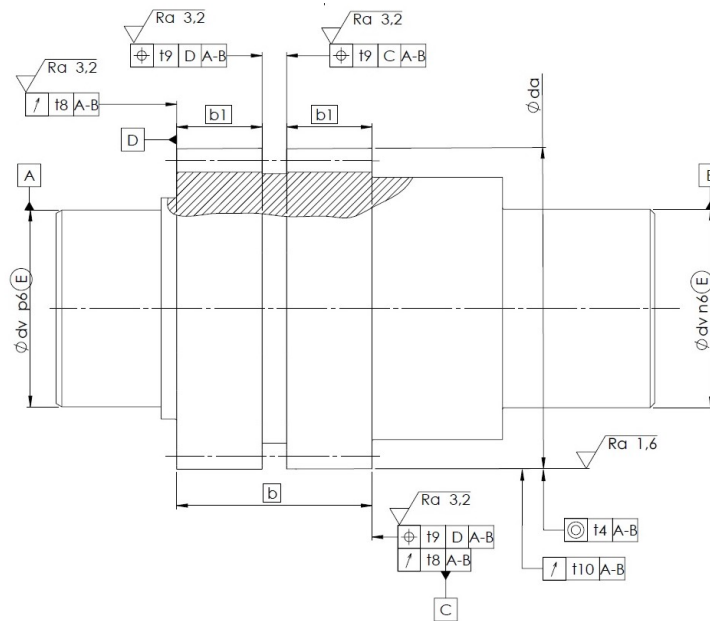


Figura 61: Cotagem aplicada a um veio-pinhão genérico [56].

Tabela 70: Expressões de calculo das tolerâncias geométricas [56].

| Tolerância [mm] | Expressão                               |
|-----------------|---|
| $t4$            | 0,02                                    |
| $t6$            | $0,2 (D_d/b) F_\beta/1000$              |
| $t8$            | $0,04 (L/b) F_p/1000$ ou $0,1 F_p/1000$ |
| $t9$            | -                                       |
| $t10$           | $0,06 (D_d/b) F_p/1000$                 |

Em casos de simetria das rodas dentadas (caso do pinhão de entrada z1), é necessário identificar a face de montagem e controlo. Essa identificação permite a correta montagem da roda dentada, visto que esta pode apresentar diferentes tolerâncias nas suas secções, provocando erros nas cadeias de cotas dos veios. A identificação no pinhão de entrada foi realizada recorrendo a diferentes chanfros. Foi, assim aplicado um chanfro de maior dimensão da face de montagem desta no veio, permitindo diferenciar e facilitar a montagem.

Uma outra tolerância, que o relatório técnico ISO/TR 10064-3 indica, é o paralelismo entre eixos, nas duas direções perpendiculares a estes, tal como representado na Figura 62. As Expressões (6.1) e (6.2) permitem calcular o valor da tolerância, em cada uma das direções, em função dos mesmos parâmetros utilizados no cálculo das tolerâncias anteriores.

$$f_{\sum \beta} = 0,5 \left( \frac{L}{b} \right) F_\beta \quad (6.1)$$

$$f_{\sum \delta} = 2 f_{\sum \beta} \quad (6.2)$$



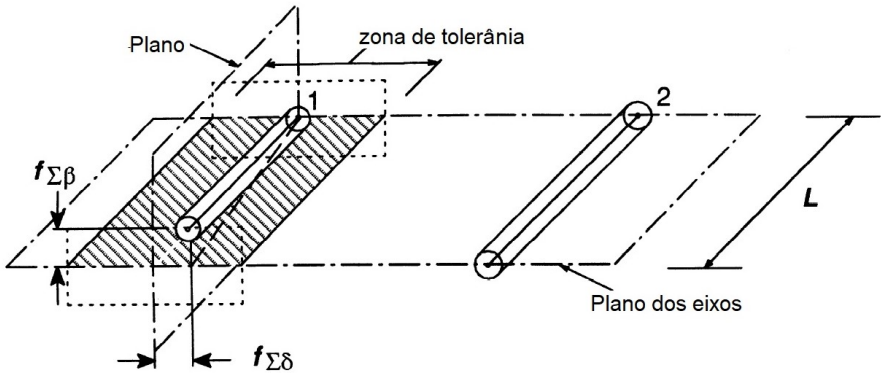


Figura 62: Tolerâncias de paralelismo dos eixos dos veios dos engrenamentos [56].

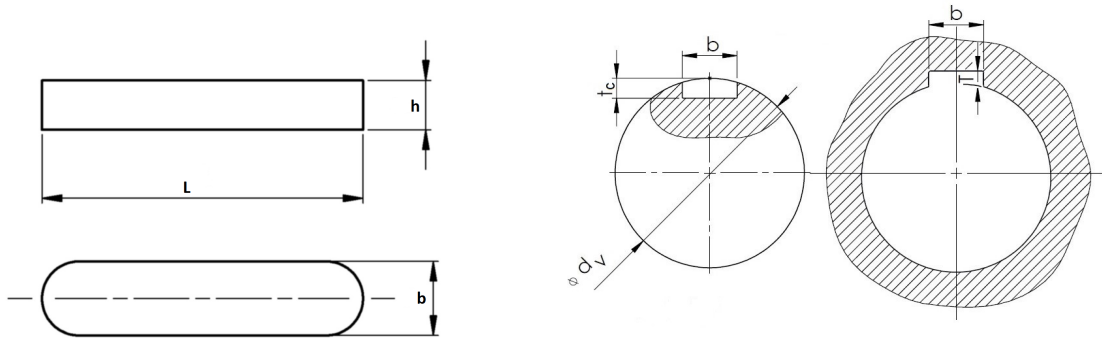
### 6.2.2 Chavetas

As chavetas são componentes normalizados, pelo que o seu toleranciamento dimensional é indicado pela norma DIN 6885 [34]. Como todas as chavetas aplicadas pertencem ao mesmo grupo dimensional (secção e comprimento), os valores das tolerâncias são iguais para todas elas. Por sua vez, foi escolhido o mesmo ajustamento para todas elas em relação aos escateis, pelo que, também estes, apresentam as mesmas tolerâncias dimensionais. Escolheu-se um ajustamento normal com guiamento para o veio, e um ajustamento apertado para o cubo (garantir a rigidez do acoplamento, visto o elevado binário e a presença de choques).

Na Tabela 71 são apresentados os valores das tolerâncias dimensionais para as chavetas e respetivos escatéis (ver Figura 63).

Tabela 71: Tolerâncias das dimensões das chavetas e respetivos escatéis [34].

| Elemento     | $h$ [mm] | $b$ [mm] | $L$ [mm]  | $t_c$ [mm]  | $T$ [mm]  |
|--------------|----------|----------|---|---|---|
| Chaveta      | h11      | h9       | $\begin{smallmatrix} 0 \\ -0,3 \end{smallmatrix}$ | -   | -   |
| Escatel veio | -        | N9       | $\begin{smallmatrix} +0,3 \\ 0 \end{smallmatrix}$ | $\begin{smallmatrix} +0,2 \\ 0 \end{smallmatrix}$ | -   |
| Escatel cubo | -        | P9       | $\begin{smallmatrix} +0,3 \\ 0 \end{smallmatrix}$ | -   | $\begin{smallmatrix} +0,2 \\ 0 \end{smallmatrix}$ |



(a) Representação da configuração da chaveta do tipo A.

(b) Representação da configuração dos escatéis do veio e do cubo, respetivamente.

Figura 63: Representação do sistema de acoplamento por chaveta [adptada de [35]].

Para a rugosidade das superfícies dos escatéis é indicado um valor de  $Ra\ 1,6\ \mu\text{m}$  para as faces laterais e de  $Ra\ 6,3\ \mu\text{m}$  para o fundo do escatel. No entanto, sabe-se que, com os processos tecnológicos atuais, se obtêm valores por si só melhores que estes [34, 35].

A chaveta de acoplamento ao exterior, está alojada numa ponta de veio normalizada, que segundo a norma respectiva, apresenta uma tolerância diametral da classe m6. Este valor é escolhido segundo a norma NF E 22-051: 1970 (que substituiu o relatório técnico ISO/R 775:1969, entretanto anulado), em função do diâmetro do veio.

### 6.2.3 Estriados

Os estriados selecionados apresentam uma conexão com centragem nos flancos dos dentes. Deste modo, os flancos são usados transmitir o binário e para centrar o cubo relativamente ao eixo, tal como representado na Figura 64.

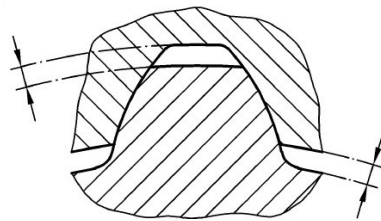


Figura 64: Conexão com centragem no flanco dos dentes [39].

Estes exibem um toleranciamento dimensional sobre os diâmetros de cabeça e de pé, e um toleranciamento geométrico (concentricidade,  $t_4$ , do eixo do diâmetro de cabeça e batimento circular,  $t_{10}$ , sobre a superfície do diâmetro de cabeça), ver Figura 65. Todos esses valores são descritos na Tabela 72, sendo estes retirados da norma DIN 5480:2006 e do software *Kisssoft*®.

Tabela 72: Tolerâncias dimensionais e geométricas de estriados em evolvente [39].

| Estriado | $d_a$ [mm] | $d_f$ [mm]   | Tol. dente | $t_4$ [mm] | $t_{10}$ [mm] |
|----------|------------|--|------------|------------|---------------|
| Ponta    | h11        | $\begin{smallmatrix} -0,05 \\ -0,12 \end{smallmatrix}$ | 8h         | 0,02       | 0,06          |
| Veio     | h11        | $\begin{smallmatrix} -0,05 \\ -0,12 \end{smallmatrix}$ | 8h         | 0,02       | 0,06          |
| RodaZ6   | H11        | $\begin{smallmatrix} +0,25 \\ 0 \end{smallmatrix}$     | 9H         | -          | 0,06          |

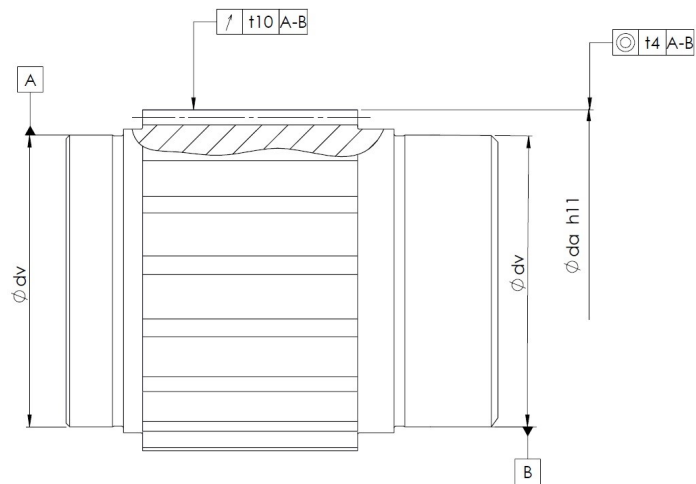


Figura 65: Toleranciamentos de um estrido em evolvente [39].

6.2.4 Rolamentos

Os valores das tolerâncias dos rolamentos e das respectivas zonas de alojamento foram retirados do catálogo de rolamentos *Koyo*®.

O toleranciamento dimensional aplicado no veio e na caixa é função do carregamento a que o rolamento esteja sujeito e ao movimento que os anéis deste assumem. O parâmetro que define a influência da carga é a razão,  $\frac{P}{C}$ , sendo os valores destas variáveis apresentados na Tabela 73 [44].

Os valores da variável  $P$  apresentados na Tabela 73, representam o carregamento máximo de cada rolamento (ver Figura 10).

Tabela 73: Valores das variáveis  $P$  e  $C$  e da razão  $\frac{P}{C}$ , para cada rolamento [*KISSsoft*®].

| Veio | Rolamento | $P$ [kN] | $C$ [kN] | $P/C$  |
|------|-----------|----------|----------|--------|
| A    | Rol1/Rol2 | 22,21    | 189      | 0,1175 |
| B    | Rol3      | 38,87    | 394      | 0,0987 |
| B    | Rol4      | 71,63    | 484      | 0,148  |
| C    | Rol5      | 38,87    | 394      | 0,0987 |
| C    | Rol6      | 71,63    | 484      | 0,148  |
| D    | Rol7/Rol8 | 2,01     | 60,5     | 0,033  |

Na solução implementada, os anéis exteriores de todos os rolamentos estão imóveis e os anéis interiores apresentam um movimento de rotação, com velocidade igual à do veio onde são alojados.

Com os dados expostos e as tabelas do Anexo C (Pág. 135), obtém-se a classe da tolerância diametral de cada uma das zonas de alojamento dos rolamentos nos veios e no cárter (classe veio e classe cubo), apresentadas na Tabela 74. Nesta Tabela são também indicados os valores da

tolerância dimensional da largura do rolamento (Figura 66),  $\Delta b$  e o código da classe de tolerância,  $cod_{tol}$ , de cada rolamento [44].

Tabela 74: Tolerâncias dimensionais e indicação da classe, para cada rolamento [44].

| Rolamento                | Classe veio | Classe cubo | $\Delta b$ [mm] | $cod_{tol}$ |
|--------------------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|
| Cónicos                  | m6          | H7          | +0,2/-0,2       | P0          |
| Auto-compensados entrada | n6          | H7          | 0 /-0,2         | P0          |
| Auto-compensados saída   | p6          | H7          | 0 /-0,2         | P0          |
| Esferas                  | k6          | H7          | 0/-0,25         | P0          |

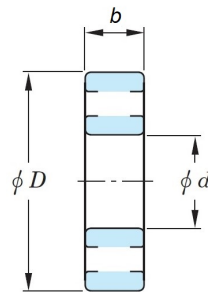


Figura 66: Representação genérica de um rolamento e suas dimensões principais [44].

As tolerâncias geométricas aplicadas nas zonas de alojamento, são evidenciadas no esquema da Figura 67. O valor da tolerância de cilindricidade,  $t_1$ , é igual a  $IT_5/2$  do diâmetro e o valor da tolerância de batimento total,  $t_2$ , é igual a  $IT_4$  do diâmetro [44].

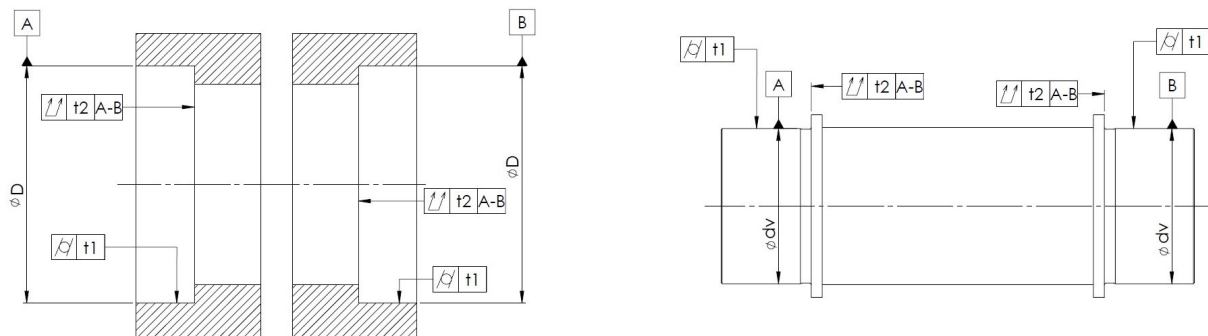


Figura 67: Toleranciamento geométrico dos locais de alojamento dos rolamentos [44].

A rugosidade das zonas de alojamento expressa em termos da rugosidade média aritmética  $R_a$ , por recomendação do fabricante (Anexo C, Pág. 135), é de  $Ra\ 1,6\ \mu m$  [44].

### 6.2.5 Cáter

Os toleranciamentos dimensional e geométrico de peças fundidas dependem de muitos fatores. No entanto, estes têm vindo a melhorar, com a sofisticação das técnicas, bem como dos equipamentos ao dispor. Em fundição, a quantidade de peças a fabricar, determina o rigor e

o acabamento apresentado pelos moldes, visto que uma produção em série permite amortecer todos estes custos da produção.

Tendo-se considerado uma produção em série destes redutores, obtém-se um toleranciamento dimensional, DCTG de grau 10 e um toleranciamento geométrico GCTG de grau 5, para moldação automatizada em areia e utilização de ferro fundido nodular. Deste modo, o toleranciamento de fundição aplicado pode ser identificado como: Tolerâncias gerais ISO 8062-DCTG 10- GCTG5 [35].

Relativamente à altura entre o eixo dos veios A e D (veio de entrada e saída) e as fundações, a norma ISO 496:1973 [46] indica uma tolerância dimensional de 0/-1 mm, e um paralelismo de 0,5 mm. Estas tolerâncias deverão ser aplicadas quando todos equipamentos acoplados estiverem numa base comum. A tolerância dimensional é unilateral para menos de modo a permitir eliminar os desvios entre máquinas, com recurso a calços.

As tolerâncias geométricas de maior importância nos meios corpos são:

- a planeza das faces de encosto com as tampas de vedação e das abas de união dos meios corpos;
- a localização dos furos dos pinos e dos parafusos de aperto nos dois meios corpos do cárter relativamente a uma das faces laterais e ao eixo comum dos veios A e D;
- a localização dos furos roscados dos parafusos de aperto e dos pinos no assento do postigo;
- a perpendicularidade das faces laterais (entrada e saída) relação ao eixo comum dos veios A e D;
- a localização relativa entre faces laterais;
- a localização dos furos roscados dos parafusos de fixação das tampas;
- etc.

As tolerâncias abordadas destacam-se, visto que são as que precisam de maior rigor para conferir ao redutor um correto funcionamento e facilitar a montagem, destes redutores em série, podendo ser observadas no desenho de definição do meio corpo inferior no Anexo E.2 (Pág. E.2).

A rugosidade assume um valor consoante a superfície, destacando -se a rugosidade de fundição,  $Ra\ 25\ \mu m$ .

O toleranciamento e a cotelagem destes dois meios corpos são detalhados nos respetivos desenhos de definição, Anexo E.2 (Pág. 281).

### 6.2.6 Postigo

Como o postigo é um componente desmontável e simultaneamente funcional, muitas das suas cotas e respetivas tolerâncias são obtidas por maquinagem, quando este estiver devidamente montado sobre o respetivo assento.

A concentricidade após mandrilagem dos furos de alojamento dos rolamentos, no cárter e no postigo, é garantida com a retificação dos pré-furos realizados ou oriundos da fundição (com

o cárter fechado e o postiço montado). Assim, os diâmetros (postiço e cárter) e a profundidade (postiço) dos furos, são cotas definidas após retificação. No entanto, no desenho de definição do postiço são indicadas as cotas e tolerâncias, que se espera obter no final (ver desenho de definição correspondente no Anexo E.2, Pág. E.2 ).

As restantes cotas e tolerâncias são obtidas pelo processo de maquinagem realizado, antes da montagem para retificação.

No processo de fundição elaboram-se pré-furos (de alojamento dos rolamentos), de modo a evitar a remoção de grandes quantidades de material e apresentar, desde já, uma referência de maquinagem, simplificando o seu processo.

A maquinagem da superfície de união do postiço e da face frontal de entrada, juntamente com o eixo comum dos pré-furos, permitem o alargamento dos pré-furos para valores próximos dos finais e a realização dos furos para os pinos de centragem e para os parafusos de fixação (ver desenho de definição correspondente no Anexo E.2, Pág. E.2).

Além da cotagem ser funcional, neste elemento teve-se presente a sequência de fabrico, para garantir que os valores de fabrico sejam exequíveis.

A utilização de máquinas CNC, permite realizar a sequência de maquinagem apresentada para este componente. Nestes equipamentos, com a definição do “zero-maquina” consegue-se realizar todas as operações de maquinagem possíveis para aquela fixação, com elevado rigor (na peça ou entre peças com a mesma referência). O importante é evitar alterar com frequência a posição de fixação da peça, pois isso leva erros no fabrico.

### 6.2.7 Tampas

O toleranciamento dimensional e geométrico das tampas é condicionado pela sua função, pelo ajustamento pretendido e pelos componentes normalizados que são alojados ou contactam com elas.

As tampas de vigia, como não apresentam contacto com o óleo e existe um sistema de respiro no bujão de adição de óleo, as suas exigências dimensionais e geométricas, bem como da rugosidade, podem assumir valores mais grosseiros. O ajustamento para o diâmetro exterior é H8/e8, e o valor da rugosidade da face de encosto com a castanha de  $Ra\ 1,6\ \mu m$  (facilmente obtida com os processos atuais de maquinagem, torneamento e fresagem). Os valores apresentados, satisfazem as exigências impostas de montagem fácil à mão e realização de uma simples maquinagem. Para melhorar a estanquidade na junta destas tampas, aplica-se silicone de vedação sobre o raio de concordância dos canhões (coincidente com a quebra da aresta realizada nos furos correspondentes no meio corpo superior, o qual apresenta um valor de chanfro superior ao raio de concordância da tampa). O toleranciamento detalhado destas tampas pode ser observado no seu desenho de definição, apresentado no Anexo E.2 (Pág. E.2).

As tampas de vedação, como estão sujeitas a condições diferentes, requerem melhores valores. O toleranciamento dimensional do canhão foi obtido em função do imposto pelo alojamento dos rolamentos no cárter (nos furos de alojamento destes) e de uma montagem fácil à mão, assumindo um valor de H7/f7. Quanto à rugosidade da face de encosto, foi arbitrado  $Ra\ 0,8\ \mu m$ , visto ser um valor atingível em maquinagem, sem recurso a retificação de superfícies. Mais uma vez, a

estanquidade é garantida com a aplicação de silicone de vedação sobre o raio de concordância.

A estanquidade é garantida de duas formas [52] :

- sem a utilização de elementos externos, onde a rugosidade na zona de vedação deve ser da ordem de  $Ra$  0,05 - 0,1  $\mu m$ , obtida por retificação das superfícies.
- com utilização de elementos externos, onde a rugosidade na zona de vedação pode ser da ordem  $Ra$  0,8 - 1,6  $\mu m$ .

A aplicação de silicone de vedação constitui uma solução economicamente mais rentável e garante uma vedação perfeita e um ajuste a eventuais deformações da tampa.

Este tipo de vedação foi aplicado segundo informações técnicas e pela observação de redutores existentes na FEUP com este tipo de vedação.

As tolerâncias geométricas aplicadas nestas tampas de vedação são apresentadas, na representação de uma tampa genérica, na Figura 68. Simplesmente, as tampas de vedação de entrada e de saída estão sujeitas às tolerâncias de concentricidade e de circularidade e à rugosidade de  $Ra$  1,6  $\mu m$  na superfície de alojamento do vedante.

A tolerância de planeza,  $t6$ , assume um valor de 0,1 mm/m da maior dimensão da superfície. Este valor deve ser baixo, para contribuir para a vedação na face de encosto, mas deve estar em conformidade com rugosidade desta face.

A perpendicularidade,  $t3$ , do eixo da tampa relativamente à face de encosto apresenta um valor de metade da folga mínima existente na montagem desta (entre o canhão e o cárter).

Aplicou-se uma tolerância de concentricidade,  $t4$ , ao eixo do furo de alojamento do vedante, que garantisse o seu correto posicionamento relativamente ao canhão da tampa, para conduzir a um perfeito contacto entre o vedante e o veio. A tolerância de circularidade,  $t5$ , é imposta pelo vedante a alojar. Perante esta situação, de duas tolerâncias geométricas para a mesma zona, a concentricidade deve ser superior à circularidade (tolerância de forma), uma vez que se trata de uma tolerância de posição.

A tolerância de localização,  $t9$ , aplicada ao comprimento do canhão, tal como já referido, substitui o toleranciamento dimensional, pela utilização de uma cota teoricamente exata e um valor de tolerância de localização. O valor da tolerância é função da montagem, sendo obtida a partir da análise das tolerâncias a aplicar nos componentes de cada veio.

A tolerância de paralelismo,  $t7$ , aplicada nas tampas de vedação ( ver Figura 68) assume o valor correspondente ao IT9 da distancia relativa. Esta tolerância é importante, pois garante uma distribuição circunferencial uniforme dos esforços axiais.

Uma outra tolerância de localização, que não é evidenciada na Figura 68, corresponde à localização dos furos dos parafusos, e assume um valor de 1 mm (metade da diferença entre o diâmetro do furo e do parafuso, isto é, a folga).

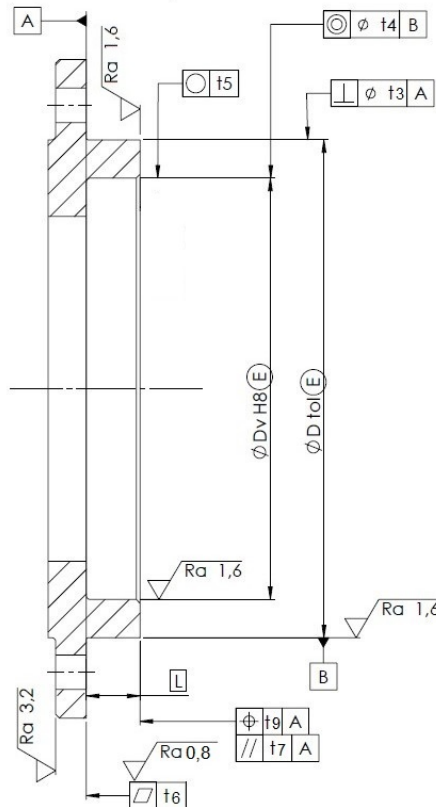


Figura 68: Representação do toleranciamento aplicado nas tampas de vedação.

### 6.2.8 Anéis elásticos

O toleranciamento destes componentes é definido pelas normas DIN 471 e DIN 472, consoante o tipo de anel (anel para veio ou anel para furo).

Na Figura 69, são evidenciadas as tolerâncias aplicadas nas ranhuras para anéis para veios. Por sua vez, as tolerâncias aplicadas nas ranhuras para anéis para furos são iguais, apenas muda a configuração da ranhura.

O valor de  $t_e$  é de 2,5, obtido pelas Equações (6.3) e (6.4) e o valor de  $n_e$  (comprimento mínimo que deve ser aplicado naquele tramo) é de 7,5.

$$t_e = \frac{d - d_2}{2}, \quad \text{para veio} \quad (6.3)$$

$$t_e = \frac{d_2 - d}{2}, \quad \text{para furo} \quad (6.4)$$

Um dado a destacar nos anéis elásticos é a sua montagem, na qual deve ser considerada uma folga, para garantir que este encaixa na sua ranhura na presença dos outros componentes alojados no veio e cuja fixação axial é feito pelo anel. Na Figura 70 é esquematizada a montagem do rolamento e anel elástico, no veio de saída.



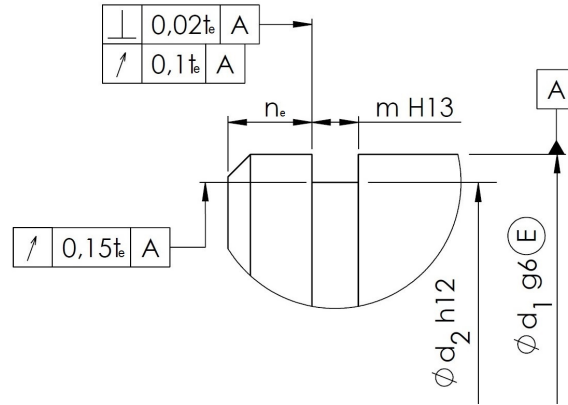


Figura 69: Toleranciamento de ranhuras de anéis elásticos [35].

Para uma primeira abordagem, considerou-se uma folga máxima de 0,2 mm e uma mínima de 0 mm. No entanto, tais valores não podem ser considerados, pois a soma das tolerâncias dos componentes normalizados é superior à tolerância de ajustamento, obtida pela folga máxima e mínima. Esta incompatibilidade é evidenciada pelas Equações (6.5) e (6.6).

$$F_{max} = T_{m_{max}} - r_{m_{min}} - a_{m_{min}} \rightarrow T_{m_{max}} = 0,2 - 0,1 - 0,25 + 20 + 4 = 24 - 0,15 \text{ mm} \quad (6.5)$$

$$F_{min} = T_{m_{min}} - r_{m_{max}} - a_{m_{max}} \rightarrow T_{m_{min}} = 0 - 0 - 0 + 4 + 20 = 24 + 0 \text{ mm} \quad (6.6)$$

Realizando os cálculos das dimensões limites para uma folga máxima de 0,5 mm e uma mínima de 0 mm, obtém-se os valores evidenciados nas Equações (6.7) e (6.8). O toleranciamento dimensional resultante é +0,15/0 mm.

$$F_{max} = T_{m_{max}} - r_{m_{min}} - a_{m_{min}} \Rightarrow T_{m_{max}} = (0,5 - 0,1 - 0,25) + 4 + 20 = 24 + 0,15 \text{ mm} \quad (6.7)$$

$$F_{min} = T_{m_{min}} - r_{m_{max}} - a_{m_{max}} \rightarrow T_{m_{min}} = (0 - 0 - 0) + 4 + 20 = 24 + 0 \text{ mm} \quad (6.8)$$

Cálculos semelhantes foram realizados para o anel exterior, que serão apresentados na Secção 6.2.11.

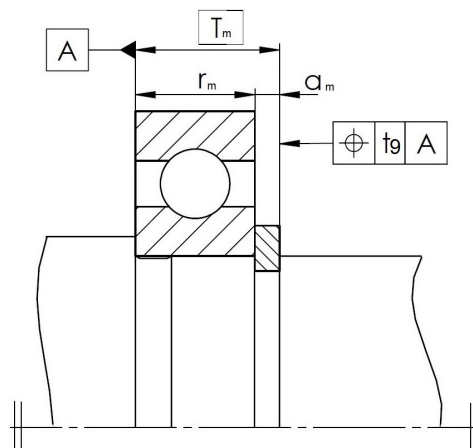


Figura 70: Toleranciamento da montagem dos anéis elásticos.

### 6.2.9 Casquilho Espaçador

Os espaçadores são os elementos utilizados, quando surge a necessidade de realizar ajustes, para se obter as folgas ou apertos pretendidos. Existem espaçadores para o diâmetro do anel interior e exterior dos rolamentos.

Os espaçadores para o diâmetro exterior dependem da tolerância do furo no cárter, aplicando-se um ajustamento H7/e8, de modo a obter-se uma fácil montagem à mão. Os espaçadores para o diâmetro interior são condicionados pela tolerância do diâmetro do veio, sendo aplicado uma tolerância de +0,2/+0,1 mm, garantindo uma montagem fácil à mão.

O restante toleranciamento será realizado como indicado na Figura 71. Nesta figura é apresentado um símbolo indicativo para a realização de um desafogo das arestas vivas, para facilitar a montagem destes. Este é aplicado sobre as arestas vivas interiores, quando o espaçador for para veio e sobre as arestas vivas exteriores, quando este for para furo, tal como se pode observar nos desenhos de definição de cada espaçador no Anexo E.2 (Pág. E.2). Nesta concepção, este símbolo assume um significado de um chanfro a 45°, com dimensão máxima de 0,5 mm.

O toleranciamento dos casquilhos espaçadores não é descrito, ao pormenor, em referências bibliográficas, pelo que se considerou como tolerâncias importantes deste componente:

- a perpendicularidade,  $t3$ , de um topo relativamente ao eixo (com um valor igual ao batimento axial de um rolamento);
- o paralelismo,  $t7$ , entre topos (com um valor correspondente ao IT9 da distância), tendo em conta que deve ser da mesma ordem de grandeza da perpendicularidade ;
- a tolerância de localização,  $t9$  (obtida segundo a cadeia de cotas do veio correspondente).

No entanto, a tolerância de localização,  $t9$ , segundo Mateos [52], apresenta uma tolerância de ajustamento entre 0,1-0,2 mm.

As rugosidades dos topos assumem um valor de  $Ra\ 1,6\ \mu m$ , sendo também a rugosidade aplicada à superfície interna ou externa dos casquilhos, consoante ele seja para diâmetro exterior ou interior, ver Figura 71 .

O toleranciamento detalhado deste componente pode ser consultado no Anexo E.2.

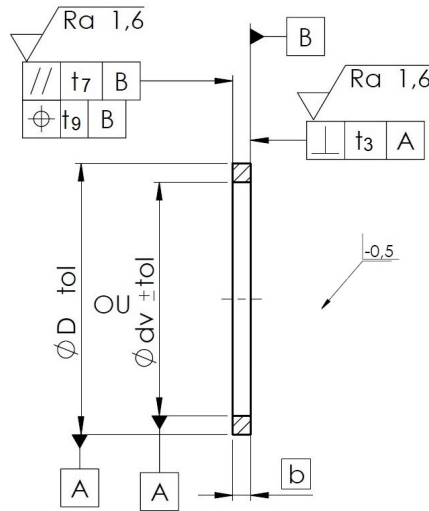


Figura 71: Toleranciamento de um casquilho.

### 6.2.10 Retentores

Os retentores são elementos normalizados, pelo que o fabricante destes indica uma classe de tolerância h11 para o veio, H8 para a caixa e uma rugosidade superficial, Ra 0,2-0,8  $\mu\text{m}$  no veio e inferiores a 4  $\mu\text{m}$  na caixa [54]. São, assim, implementadas rugosidades de Ra 0,4  $\mu\text{m}$  e 1,6  $\mu\text{m}$ , respetivamente. O fabricante indica também uma tolerância de circularidade, com valor correspondente ao IT8 do diâmetro. Estas indicações encontram-se evidenciadas nos desenhos de definição das tampas e veios de entrada e saída, no Anexo E.2 (Pág. E.2).

### 6.2.11 Veios

O toleranciamento axial de um veio e dos componentes não normalizados nele alojados, depende das condições de montagem (ajustes e alinhamento do dentado por andar) e das tolerâncias dos componentes normalizados.

O toleranciamento em torno do veio A (veio de entrada) resultou de um processo iterativo de valores adequados para cada um dos componentes não normalizados nele montados.

Nesta etapa, foram arbitradas tolerâncias dimensionais para as cotas funcionais A e D da Figura 72, de modo a localizar o furo do pino e a obterem-se tolerâncias adequadas para os componentes não normalizados deste veio A, respetivamente. Através destas duas cotas, juntamente, com a cota funcional B (também arbitrada e associado ao postigo), conseguir-se-á obter a cota C, que corresponde ao valor previsto da profundidade do furo do postigo após retificação. Os valores limites da cota C são calculados pelas Equações (6.9) e (6.10).

$$C_{max.} = D_{max.} - A_{min.} + B_{max.} = 183,7 - 190,8 + 40,1 = 33 \quad (6.9)$$

$$C_{min.} = D_{min.} - A_{max.} + B_{min.} = 182,4 - 190,2 + 39,9 = 31,1 \quad (6.10)$$

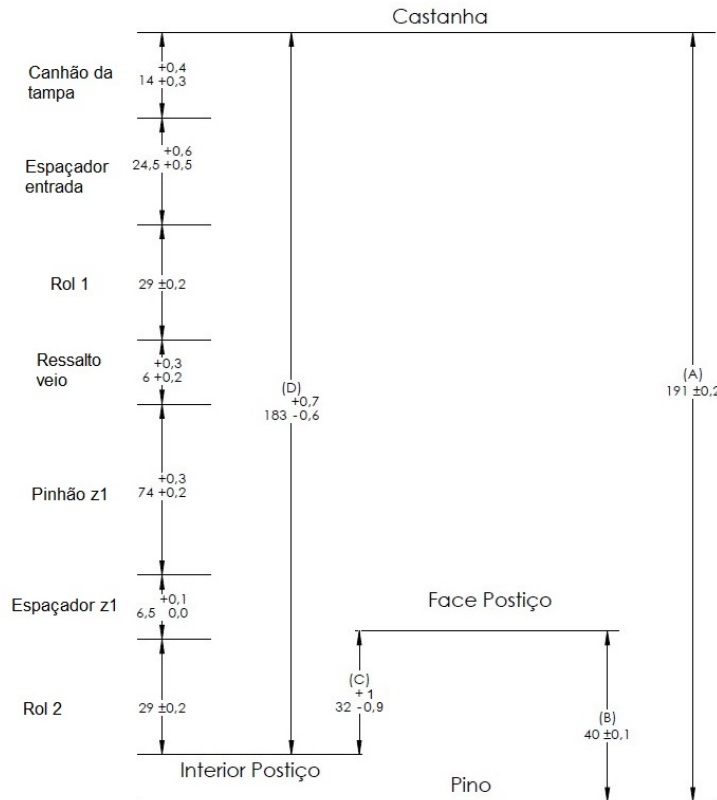


Figura 72: Cotagem e toleranciamento aplicado no veio A (veio de entrada).

Neste veio, são alojados os rolamentos cónicos, que precisam de um pré-esforço, realizado por deslocamento axial. Para se conseguir realizar esse aperto, considerou-se que a dimensão mínima do somatório dos comprimentos dos componentes deve ser superior ao máximo da cota D. Considerou-se um aperto de 0,1 mm, que deverá ocorrer neste caso extremo (soma dos comprimentos máximos de todos os elementos). Tal requisito pode ser verificado na comparação entre os resultados das Equações (6.11) e (6.12) e os valores limites da cota D.

Na realidade, nem todas as cotas dos componentes são mínimas, pelo que a cota soma máxima é superior à cota D mínima e o aperto é superior ao arbitrado. Isto leva à retificação do casquilho, no momento da montagem, para uma dimensão que garanta, simultaneamente, o encosto da tampa ao cárter e o pré-esforço necessário.

$$D_{max} \sum = \sum Y_{i_{max}} = 29,2 + 6,6 + 74,3 + 6,3 + 29,2 + 25,1 + 14,4 = 185,1 \quad (6.11)$$

$$D_{min} \sum = \sum Y_{i_{min}} = 28,8 + 6,5 + 74,2 + 6,2 + 28,8 + 25 + 14,3 = 183,8 \quad (6.12)$$

Uma outra cota a verificar é o comprimento da zona do veio A sem rebaixo (zona de alojamento da roda). Assim, a dimensão máxima dessa zona deve ser inferior à mínima dimensão do somatório dos componentes alojados sobre ela (pinhão z1 e o espaçador z1). Sendo a dimensão dessa zona de  $79 +0,6/-0,6$  (valor arbitrado), do pinhão z1 de  $74 +0,3/-0,2$  e do casquilho de

entrada de  $6,5 +0,1/0$ , resultam os seguintes valores: 80,7 e 80,9, para a soma (ver desenho de conjunto junto à zona do postigo no Anexo E.1, Pág. E.1).

A análise do veio intermédio (B/C) deve ser dividida em duas partes. A primeira, Figura 73, corresponde à zona de entrada, que engloba o alinhamento das engrenagens z1, z2 e z4 pela face junto à entrada, o Rol. 3 (rolamento), o espaçador intermédio e a tampa intermédia de entrada.

A soma das dimensões dos componentes do veio A (veio de entrada) até à face de alinhamento, mais a soma das dimensões dos componentes do veio B/C (veio intermédio), desde essa face de alinhamento até à castanha, tem de ser igual à cota D. Deste modo, podem ser calculados os valores dos componentes do veio intermédio.

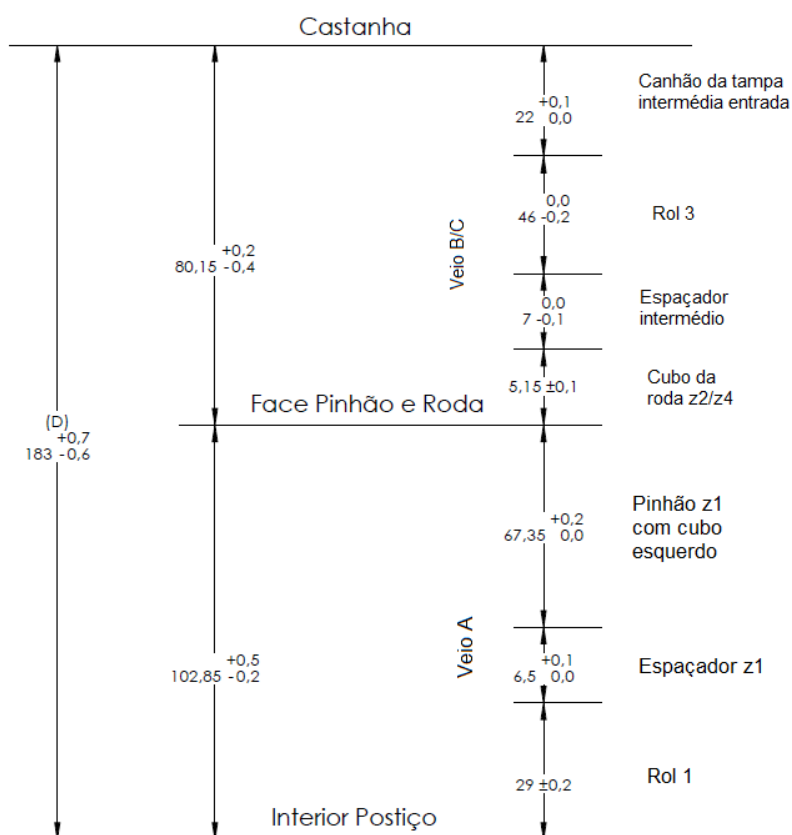


Figura 73: Cotagem e toleranciamento aplicado na zona de entrada do veio intermédio (B/C).

Cruzando os dados do veio de entrada e do veio intermédio são identificadas duas das dimensões do pinhão z1. A largura do cubo do pinhão, 74 mm e a largura do dentado mais o canhão esquerdo, 67,35 mm, pelo que se pode obter a cota do cubo do lado direito do pinhão z1, com a respetiva tolerância.

A segunda parte, Figura 74, contempla toda a largura do cárter (de castanha a castanha), para a qual é arbitrada uma tolerância. O valor da tolerância teve em conta as tolerâncias atribuídas na primeira parte e as tolerâncias que vão ser atribuídas aos restantes componentes deste veio.

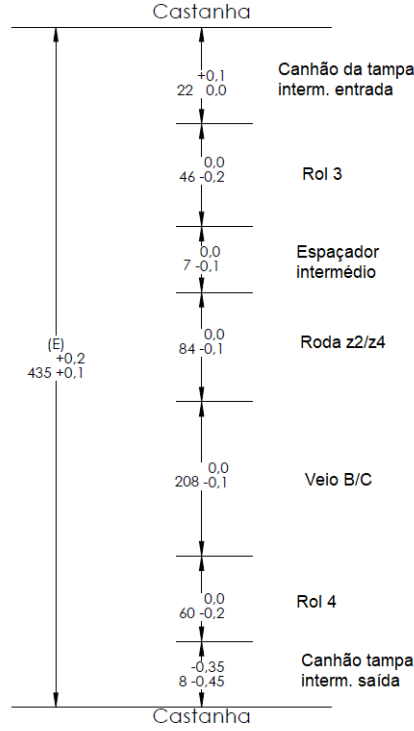


Figura 74: Cotagem e toleranciamento aplicado a todo o veio intermédio B/C.

Para acomodar a dilatação térmica axial,  $\delta y$  do veio foi implementada uma folga no lado da saída, baseada no cálculo da dilatação, previamente realizado. A dilatação,  $\delta y$ , calculada foi de 0,32 mm, Equação (6.13).

$$\delta y = C_{\alpha} L_0 \delta T = 13,6 \times 10^{-6} \times 392 \times (80 - 20) = 0,32 \text{ mm} \quad (6.13)$$

onde:

- $\delta y$  - variação do comprimento do veio;
- $C_{\alpha}$  - coeficiente de dilatação térmica;
- $L_0$  - comprimento inicial;
- $\delta T$  - variação de temperatura.

A variação de temperatura utilizada nos cálculos representa a diferença entre a temperatura do rolamento alojado e a temperatura de montagem do veio.

Perante estes resultados, a folga considerada é de +0,5/+0,35. No entanto, estes valores não podem ser implementados, pois só a soma das tolerâncias dos componentes normalizados,  $\sum T_{i_{normalizados}}$ , já é superior à tolerância de ajustamento,  $T_{aj.}$  resultante da folga pretendida (folga máxima,  $F_{max}$ , e folga mínima,  $F_{min}$ ). Tais relações estão enunciadas nas Equações (6.14), (6.15) e (6.16).

$$T_{aj.} = F_{max} - F_{min} = 0,15 \quad (6.14)$$

$$T_{aj.} = \sum T_i \quad (6.15)$$

$$T_{aj.} = \sum T_{i_{normalizados}} = 0,4 \quad (6.16)$$

Perante esta incompatibilidade, tem de se garantir a folga mínima e realizar um ajuste por outra via. Existem assim duas maneiras de o realizar: comprimento do canhão da tampa superior ao pretendido e respetiva retificação ou comprimento do canhão da tampa inferior ao pretendido e respetiva adição de anilhas (de ouro mouro, por exemplo). Estas soluções são traduzidas da seguinte forma:  $E_{max} \leq F_{min} + \sum Y_{i_{min}}$  e  $E_{min} \geq F_{min} + \sum Y_{i_{max}}$ , respetivamente. O elemento utilizado para este ajuste nesta situação será a tampa intermédia da face de saída.

Considerando um valor total,  $E$ , de  $435 +0,2/+0,1$  mm, obtém-se os valores máximo e mínimo do comprimento do canhão da tampa para essas duas situações.

Optou-se pela solução de adição de anilhas, pois o processo de montagem será mais rápido e mais barato (evita-se a realização de retificações que são processos caros e demorados). A maior limitação desta solução é a existência de medidas normalizadas para as anilhas, tendo que as mandar fazer por medida. O resultado final para este veio está evidenciado na Figura 74.

Ainda dentro da análise do veio intermédio, teve de fazer-se uma conversão de cotas na roda intermédia, para se realizar a cotagem e toleranciamento desta no desenho de definição (Anexo E.2, Pág. E.2). Tal aconteceu porque se pretendeu obter os desvios para a cota  $d_{r2}$  de 78,85 mm, a partir dos arbitrados para a largura total  $d_r$  de 84 mm e para o cubo da direita  $d_{r1}$  de 5,15 mm, Figura 75. Destes cálculos resulta:

$$d_{r1_{max}} = 5,25 = d_{r_{max}} - d_{r2_{min}} \rightarrow d_{r2_{min}} = 84 - 5,25 = 78,85 - 0,1 \quad (6.17)$$

$$d_{r1_{min}} = 5,05 = d_{r_{min}} - d_{r2_{max}} \rightarrow d_{r2_{max}} = 84 - 0,1 - (5,15 - 0,1) = 78,85 \quad (6.18)$$

Os resultados obtidos traduzem uma tolerância de  $0/-0,1$  para a cota  $d_{r2}$ .

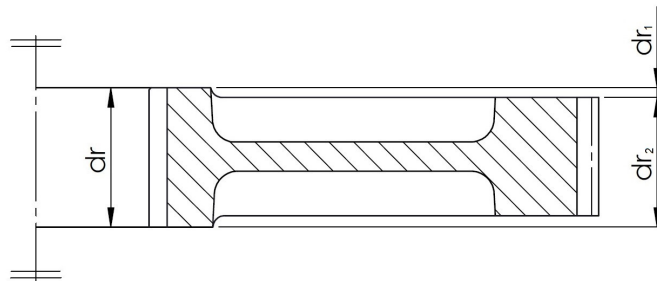


Figura 75: Representação esquemática do cálculo da cota  $d_{r2}$ .

A análise do veio D (veio de saída) também deve ser efetuada por etapas (ver Figura 76). Inicialmente analisa-se a montagem dos componentes entre a castanha de saída e o anel exterior, cota G. Para esta montagem, tal como se realizou para os outros anéis, atribui-se uma folga máxima e mínima. Os valores de folga atribuídos são  $+0,2/0$  mm. No entanto, a tolerância de

ajustamento da folga é inferior à dos componentes normalizados, pelo que não é possível obter os resultados por esta via. Deste modo, restam as hipóteses de aumentar a folga para valores três vezes superiores ou realizar um ajustamento como o efetuado para os veios intermédios. Esta folga é implementada para garantir a montagem da tampa sem que o anel elástico fique sujeito a esforço axial.

Para esta situação, optou-se, novamente, pelo ajuste por anilhas. O resultado final está apresentado na Figura 76. As folgas máxima e mínima obtidas são de 0,65 mm e 0 mm, respetivamente.

A segunda etapa passa por atribuir corretamente as tolerâncias dimensionais das dimensões axiais do veio D aos restantes componentes não normalizados nele alojados. Para tal, é necessário clacular primeiro o valor da cota H (ver Figura 76), que representa o comprimento total dos componentes alojados no veio D, que contribuem para a obtenção da cota I. O valor da cota H é obtido em função da cota G e da cota do anel elástico (4 mm), tal como representado na Figura 76. Após esse cálculo e a atribuição da cota 180 mm, ao comprimento entre a face de encosto do rolamento e o topo do veio, procede-se à comparação entre a cota I e a cota J. Esta comparação é realizada para verificar se a cota I máxima é inferior à cota F mínima, certificando-se assim que o veio D não encosta à parede interna do postigo. Verifica-se assim que a cota I máxima é de 238,7 mm, que é inferior aos 241,2 mm da cota J mínima.

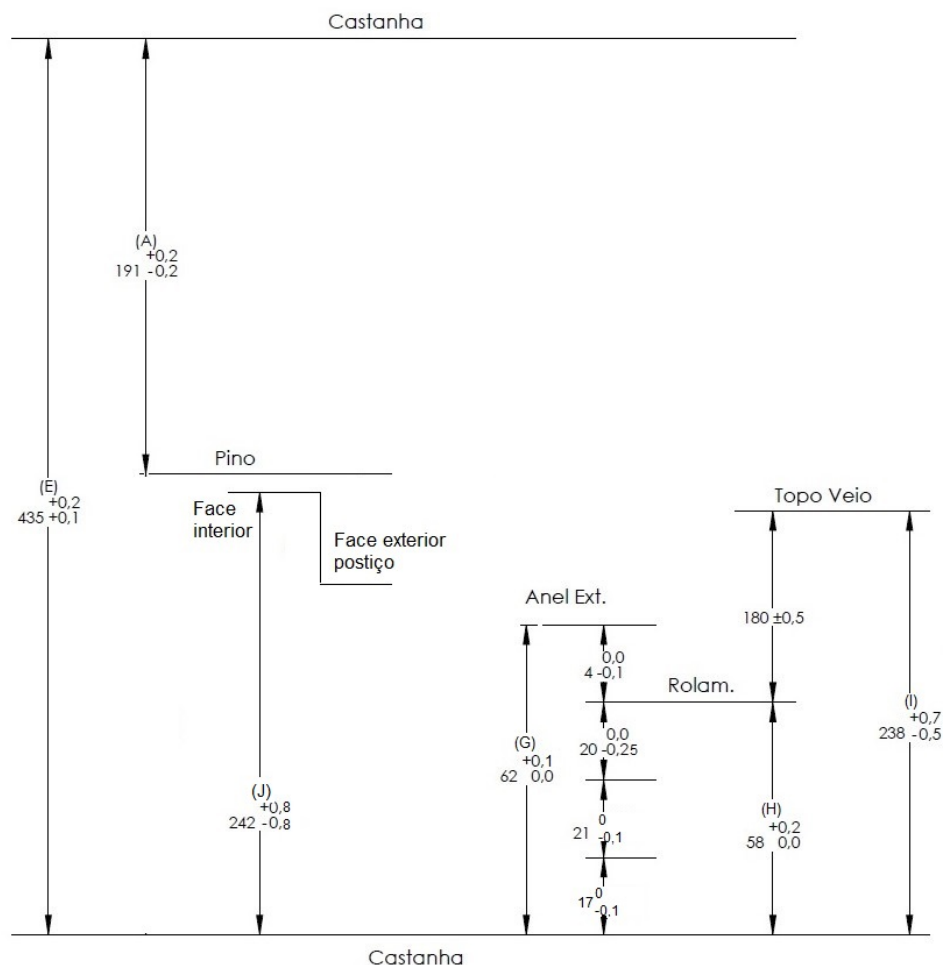


Figura 76: Cotação e toleranciamento aplicado em torno do veio de saída.



## 7 Conclusões e trabalhos futuros

### 7.1 Conclusões

O objetivo do trabalho foi atingido, apresentando-se uma solução dentro dos parâmetros exigidos.

Com o tempo disponibilizado para a sua realização, conseguiu-se aprofundar determinados tópicos importantes, que permitiram dar realce ao redutor. Conseguiu-se desenvolver as capacidades de conceção e o espírito crítico, na seleção de soluções e na implementação de decisões. Permitiu também a aplicação dos fundamentos teóricos transmitidos, e perceção do procedimento a adotar num projeto de conceção, bem como a importância da engenharia simultânea.

No Capítulo 2, com a apresentação da informação sobre o conceito de “*power split*” e das características dos redutores de eixos paralelos, constatou-se a acrescida importância do dentado helicoidal e da correta divisão de potência no primeiro andar, bem como da junção no segundo. Com estas informações e as apresentadas no Capítulo 3, foi possível implementar nas várias configurações (configurações simples e mistas) as melhores características do dentado. Deste modo, no Capítulo 3, conclui-se que para além da importância do tipo de dentado, o material e os acabamentos de superfície dos componentes são fundamentais para uma otimização do redutor, a vários níveis, tais como: estrutural, atravancamento, energético e térmico. Conclui-se, também que o atravancamento do redutor foi ditado, essencialmente, pelas dimensões das engrenagens, visto que a configuração traçada para o redutor (eixos no mesmo plano e paralelos), impôs o mesmo entre-eixo em ambos os andares, limitando muitas soluções.

O Capítulo 4 permitiu, sobretudo, reforçar a importância da otimização das rodas dentadas. Constatou-se que simples alterações destas e uma correta lubrificação conduzem ao aumento da eficiência dos redutores, e que a otimização praticada neste redutor levou à obtenção de um rendimento global acima do apresentado por redutores de eixos paralelos simples.

Entrando no Capítulo 5, verificou-se que, para conferir uma consistência à conceção de um redutor, é necessário avaliar a integridade estrutural do cárter e dos componentes periféricos que o constituem, tal como foi realizado neste trabalho, visto que a informação teórica não é totalmente válida para todas as situações. Tal aconteceu neste projeto a nível, essencialmente, do postigo, onde parecia que as dimensões previstas seriam suficientes e que a conceção era simples.

O Capítulo 6 conduziu a uma identificação da importância que o toleranciamento apresenta na montagem e funcionamento do redutor e do acabamento de superfície dos componentes na vedação. Mas o mais importante foi perceber novamente que nem sempre se consegue aplicar os conceitos teóricos na sua totalidade. Existe sempre uma dependência do caso em análise e do seu processo de obtenção.

## 7.2 Trabalhos futuros

Visto ter-se abrangido uma gama alargada de temas, os quais requerem um estudo mais aprofundado, e até mesmo um contato com a experiência prática, são recomendados os seguintes trabalhos:

- perante a solução proposta, aperfeiçoar a secção do postigo;
- explorar novas formas de fixação dos rolamentos do veio D;
- verificar a vantagem do dentado helicoidal duplo em ambos os andares;
- desenvolver uma análise em torno da estrutura do cárter e redefinir algumas geometrias, implementando as restantes exigências da fundição;
- realizar os desenhos de fabrico;
- adequar o toleranciamento dos desenhos de definição às capacidades reais de fabrico (colaboração com uma dada empresa).

## Referências

- [1] **Faria, Iolanda Balcky.** «Seleção de um redutor de engrenagens para um agitador e planeamento das ações das ações de manutenção». Tese de mestrado. Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [2] **Almacinha, José A.** *Redutor de engrenagens cilíndricas de dentado exterior*. 5th. MIEM: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.
- [3] **KHK STOCK GEARS.** *Tipos e Mecanismos de Redutores de Engrenagem / KHK Gears*. [https://khkgears.net/new/gear\\_knowledgeTypes\\_and\\_Mechanisms\\_of\\_Gear\\_Reducers.html](https://khkgears.net/new/gear_knowledgeTypes_and_Mechanisms_of_Gear_Reducers.html). (Accessed on 03/14/2019).
- [4] **MEADinfo.** *Comparação das eficiências da engrenagem - espora, helicoidal, bisel, sem-fim, hipóide, Cycloid*. <https://www.meadinfo.org/2008/11/gear-efficiency-spur-helical-bevel-worm.html>. (Accessed on 03/14/2019).
- [5] **SANTRAM Engineers.** *Caixa de engrenagens helicoidal: entenda suas vantagens e aplicações*. <http://www.santramengineers.com/helical-gearbox-understand-advantages-applications/>. (Accessed on 03/14/2019).
- [6] **Radzevich, Stephen P.** *Handbook of Practical Gear Design and Manufacture*. 9781439866023 2nd. Boca Raton: Engineering Technology, 2012.
- [7] **Krantz, Timothy L, Rashidi, Majid e Kish, Jules G.** «Split torque transmission load sharing». Em: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 208 (2) (1994), pp. 137–148.
- [8] **Lohmuler, Friedrich A.** *Planetary Gear*. <http://bestanimations.com/Science/Gears/Gears2.html>. (Accessed on 03/14/2019).
- [9] **Giger, U. e Arnaudov, K.** «High efficiency high torque gearbox for multi megawatt wind turbines». Em: *Machines Technologies Materials* 1 (2010), pp. 19–24.
- [10] **Rashidi, Majid e Krantz, Timothy.** *Dynamics of a split torque helicopter transmission*. Rel. téc. 1992.
- [11] **Niemann, Gustav.** *Elementos de Máquinas*. Vol. 1. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Lda, 1971.
- [12] **ISO 6336-1:1996.** *Calculation of load capacity of spur and helical gears. Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors*. BRITISH STANDARD. Geneva, CH: International Organization for Standardization, 1996.
- [13] **Silva, Altino Moreira da.** *Apontamentos de dimensionamento de engrenagens*. FEUP, 2017.
- [14] **ISO/TR 4467:1982.** *Addendum modification of the teeth of cylindrical gears for speed-reducing and speed-increasing gear pairs*. BRITISH STANDARD. International Organization for Standardization, 1982.
- [15] **Almacinha, José A. e Seabra, Jorge H. O.** *A correção de dentado em rodas cilíndricas de engrenagens exteriores redutoras e multiplicadoras*. CETRIB; DEMEGI: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1991.

- [16] **NFE 23 013-1 : 1993.** *Addendum modification of the teeth of cylindrical gears for speed-reducing and speed-increasing gear pairs.* BRITISH STANDARD. International Organization for Standardization, 1996.
- [17] **Castro, Paulo Tavares de.** *Apontamentos de Orgãos de Máquinas- O cálculo da capacidade de carga de engrenagens cilíndricas.* Departamento de Engenharia Mecânica, FEUP, 2006.
- [18] **Castro, Paulo Tavares de.** *Apontamentos de Orgãos de Máquinas- Parafusos de Transmissão de Potência e de Ligação.* Departamento de Engenharia Mecânica, FEUP, 2006.
- [19] **DIN 3990-1:1987.** *Calculation of Load Capacity of Cylindrical Gears - Introduction and General Influence Factors.* DEUTSCHE NORMEN. Berlin: German Institute for Standardisation, 1987.
- [20] **KISSsoft AG.** *KISSsoft Manual.* Rosengartenstrasse 4. Bubikon Schweiz, 2018.
- [21] **Maag gear company LTD.** *MAAG GEAR BOOK.* Engineering,Technology. Zurich, 1990.
- [22] **Henriot, Georges.** *Traité théorique et pratique des engrenages.* 4th. Paris: Dunod, 1968.
- [23] **Ramada Aços®.** *Catálogo Ramada.* 2018.
- [24] **Movnin, M. e Goltziher, D.** *Machine Design.* Mir Publishers Moscow, 1 st, 1975.
- [25] **ISO/TR 18792:2008.** *Lubrication of industrial gear drives.* Rel. téc. Geneva: International Organization for Standardization, 2008.
- [26] **Seabra, Jorge H. O.** *Engrenagens-Lubrificação,Rendimento e Avarias.* Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, FEUP, 1 st, 2005.
- [27] **Henriot, Georges.** *Traité théorique et pratique des engrenages 2.* 5th. Paris: Dunod, 1983.
- [28] **Marković, Kristina e Vrcan, Željko.** *Influence of Tip Relief Profile Modification on Involute Gear Stress.* Rel. téc. Transactions of Famena XL-2, 2016.
- [29] **Soto, T. Carreras.** *Engranajes-Trazados Teorico e Practico.* 1st. Sevilha,Espanha: Dibujo TCS, 1942.
- [30] **Reshetov, D. N.** *Atlas de construção de maquinas.* Hemus. Moscou, 2005.
- [31] **ISO/TR 14179-2.** *Gears-Thermal capacity. Part 2: Thermal load-carrying capacity.* Rel. téc. Geneva: International Organization for Standardization, 2001.
- [32] **Bernd-Robert, Klaus Michaelis e Thomaas Vollmer, FZG.** *Thermal Rating of Gear Drives-Balance Between Power Loss and Heat Dissipation.* Rel. téc. Virginia: American Gear Manufacturers Association, 1996.
- [33] **IS 3688:1990.** *Power Transmission - Shafts - Dimensions for Cylindrical and 1/10 Conical Shaft Ends.* New Delhi: Indian Standard, 2006.
- [34] **DIN 6885-1:1968.** *Parallel Keys.* DEUTSCHE NORMEN. Berlin: German Standards, 1968.
- [35] **Almacinha, José A. e Moraes, José Simões.** *Desenho de construção mecânica- Apon-tamentos teórico-praticos.* Secção de Desenho Industrial do DEMec, 2015/2016.

- [36] **Almacinha, José A. e Morais, José Simões.** *Apontamentos teórico-práticos de desenho técnico.* Departamento de Engenharia Mecânica, FEUP.
- [37] **Chevalier, A.** *Guide du dessinateur industriel.* Hachette Technique, 1998.
- [38] **DIN 5480-14:2006.** *Involute Spline with 30 ° pressure angle- sides fits- Tolerances.* DEUTSCHE NORMEN. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2006.
- [39] **DIN 5480-1:2006.** *Splined connections with involute splines based on reference diameters — Part 1: Principles.* DEUTSCHE NORMEN. Berlin: DIN Deutsches Institut Normung, 2006.
- [40] **Castro, Paulo Tavares de.** *Apontamentos de Orgãos de Máquinas- Aspectos de abordagem Alemã ao dimensionamento à fadiga: de Bach à norma DIN 743.* Departamento de Engenharia Mecânica, FEUP, 2006.
- [41] **DIN 743 - 1:2008.** *Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen.* DEUTSCHE NORMEN. Outubro de 2008.
- [42] **hyprofiltration.** *UNDERSTANDING ISO CODES.* <https://www.hyprofiltration.com/clientuploads/directory/Knowledge/PDFs/ISO20Intro.pdf>. (Accessed on 01/05/2019).
- [43] **Schroeder.** *ISO Codes - and - Standards.* [www.hydnet.se/50.0.1.0/6842/download\\_6424.php](http://www.hydnet.se/50.0.1.0/6842/download_6424.php). (Accessed on 01/05/2019).
- [44] **Koyo®.** *Koyo-Ball and Roller Bearings.* 2014.
- [45] **SKF®.** *Catálogo Geral.* 2015.
- [46] **ISO 496:1973.** *Driving and Driven Machines - Shaft Heights.* New Delhi: ISO, 1987.
- [47] **Neto, Rui.** *Apontamentos - Regras de traçado de peças fundidas.* FEUP, 2012.
- [48] **Magalhães, A. Barbedo de.** *Introdução à Fundução-Cap.3- Traçado de peças fundidas.* FEUP, 2009.
- [49] **infomet.** *Aços e Ligas - Aços e Ferros Fundidos.* <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=164>. (Accessed on 01/05/2019).
- [50] **Magalhães, A .G.** *FERROS FUNDIDOS. TIPOS E TRATAMENTOS.* INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO, 2000.
- [51] **Tenace.** *Ferros Fundidos Nodulares.* [www.fundicaotenace.com.br/Nodular.xls](http://www.fundicaotenace.com.br/Nodular.xls). (Accessed on 01/05/2019).
- [52] **Mateos, Abelardo Garcia.** *Tolerâncias e ajustes.* S.Paulo: Ed. Polígono S.A., 1974.
- [53] **Elesa®.** *Accessories for hydraulic systems.* 2019.
- [54] **FREUDENBERG®.** *SIMMERRING AND ROTARY SEALS – VOLUME 11.* 2015.
- [55] **ISO 1328-1:2013.** *Cylindrical gears — ISO system of flank tolerance classification — Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth.* Switzerland: International Organization for Standardization, 2013.
- [56] **ISO/TR 10064-3:1996.** *Cylindrical gears - Code of inspection practice - Part 3: Recommendations relative to gear blanks, shaft centre distance and parallelism of axes.* Rel. téc. Switzerland: ISO, 1996.

- [57] **DIN 3966-1:1978.** *Information on gear teeth in drawings.* DEUTSCHE NORMEN. Berlin: German Standard, 1978.
- [58] **Manfè, Giovanni Pozza.** *Desenho Técnico Mecânico-Vol1.* HEMUS, 1977.

## A Anexo: Dimensionamento de componentes

### A.1 Juntas pré-esforçadas

O esforço num parafuso, em geral, não é igual a  $F_p^f = F_i + F_e$ , em que  $F_i$  é o pré-esforço e  $F_e$  é o esforço exterior a que cada parafuso da junta está sujeito. Isto acontece porque o esforço  $F_e$ , a que a junta está sujeita, não é totalmente transmitido ao parafuso, pois parte dele é utilizado para diminuir a compressão a que os elementos ligados estão sujeitos.

De modo a facilitar a interpretação das expressões, as seguintes letras  $i, f, p, l$ , designam, situações iniciais ( $i$ ) e finais ( $f$ ), isto é, depois da aplicação da carga exterior, respeitantes ao parafuso ( $f$ ) e elementos ligados ( $l$ ).

Nas equações seguintes, a compressão nos elementos ligados é tomada em valor absoluto.

Com a ajuda do esquema da Figura 77, consegue-se estabelecer as relações entre as varias forças, tal como representado nas Equações (A.1), (A.2) e (A.3).

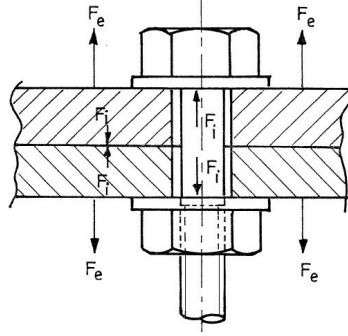


Figura 77: Representação de uma junta pré-esforçada [18].

$$\Delta F_p + \Delta F_l = F_e \quad (\text{A.1})$$

$$F_p^f = F_i + \Delta F_p \quad (\text{A.2})$$

$$F_l^f = F_i - \Delta F_l \quad (\text{A.3})$$

Se não existir desencosto, o alongamento dos elementos ligados é igual ao do parafuso,

$$\Delta L_p = \Delta L_l \quad (\text{A.4})$$

e por definição de comportamento linear,

$$k_p = \frac{F_p}{\delta_p} \quad (\text{A.5})$$

$$k_l = \frac{F_l}{\delta_l} \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{\Delta F_p}{k_p} = \frac{\Delta F_l}{k_l} \quad (\text{A.7})$$

Aplicando a Equação (A.7) na Equação (A.1), obtém-se

$$\Delta F_p + \frac{k_l}{k_p} \Delta F_p = F_e \quad (\text{A.8})$$

Desenvolvendo as Equações (A.1) e (A.8), resulta

$$\Delta F_p = \left( \frac{k_p}{k_l + k_p} \right) F_e \quad (\text{A.9})$$

$$\Delta F_l = \left( \frac{k_l}{k_l + k_p} \right) F_e \quad (\text{A.10})$$

e portanto,

$$F_p^f = F_i + \left( \frac{k_p}{k_l + k_p} \right) F_e \quad (\text{A.11})$$

$$F_l^f = F_i - \left( \frac{k_l}{k_l + k_p} \right) F_e \quad (\text{A.12})$$

A rigidez dos elementos é determinada pelas Equações (A.13) e (A.14),

$$k_p = \frac{F}{\Delta l} = \frac{A_p E_p}{l_p} \quad (\text{A.13})$$

$$k_l = \frac{A_l E_l}{l_l} \quad (\text{A.14})$$

onde:  $A_p$  é a área da secção reta do parafuso,  $E$  é o módulo de elasticidade,  $l_p$  é o comprimento do parafuso (igual à espessura dos elementos a unir),  $A_l$  é a área da secção da ligação na vizinhança do parafuso e  $l_l$  é o comprimento da ligação estabelecido pelos elementos ligados.

A Equação (A.14) é, apenas, válida para juntas de elementos ligados com o mesmo  $E_l$ . Para casos de elementos a unir, com materiais diferentes, o valor de  $k_l$  é obtido considerando a constante de rigidez equivalente do conjunto, isto é,  $k_l = k_{eq}$ ,

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots \quad (\text{A.15})$$



onde  $k_1, k_2, \dots$ , são as constantes elásticas dos diversos elementos a unir. Conforme o "Shigley"[18] indica, se um dos valores  $k_i$  é baixo por comparação com os outros, ele predomina, e o valor de  $k_{eq}$  pode assumir esse valor.

Um outro parâmetro importante a explicar é a área correspondente à ligação, por cada parafuso. Esta pode ser calculada de forma aproximada, considerando um anel circular de diâmetro interior igual ao do parafuso e o exterior igual a três vezes esse diâmetro. Por sua vez, a área da ligação pode ser igual à área total da superfície de contacto dividida pelo número de parafusos.

Regressando à análise dos esforços, estes assumem um comportamento, como o representado nos esquemas das Figura 78 e 79 . Verifica-se que o aumento do pré-esforço  $F_i$ , conduz a deformações em ambos elementos, em sentidos opostos (compressão e tração).

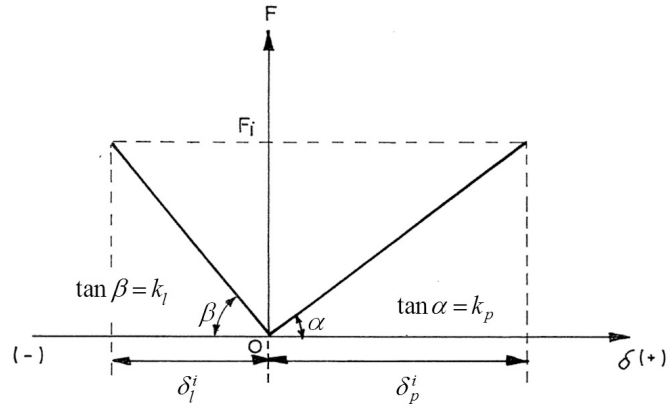


Figura 78: Representação gráfica da evolução dos deslocamentos com o  $F_i$  [18].

Com a representação gráfica da Figura 79, obtém-se para cada valor de carga exterior  $F_e$ , a sua repartição pelo parafuso e pela junta ( $\Delta F_p$  e  $\Delta F_l$ ).

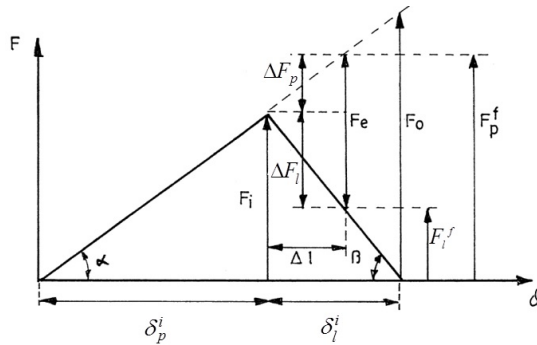


Figura 79: Representação do comportamento dos esforços em função de  $F_e$  [18].

Através da Figura 79, constata-se que para um dado valor de  $F_i$ , o aumento do esforço  $F_e$  leva a um aumento da força final do parafuso  $F_p^f$  e uma diminuição do esforço da ligação  $F_l^f$ , que atinge um valor nulo para um valor  $F_e$  específico. Este valor corresponde ao esforço exterior  $F_e$ , que conduz à separação da junta (valor máximo a exercer na junta para um dado  $F_i$ ).

Com recurso ao esquema da Figura 79, e utilizando as relações entre esforços e deslocamentos,

obtém-se

$$\frac{F_0}{F_i} = \frac{\delta_p^i \delta_l^i}{\delta_p^i} = \frac{k_p + k_l}{k_l} \rightarrow F_0 = \frac{k_p + k_l}{k_l} F_i \quad (\text{A.16})$$

Reorganizando a Equação (A.16), resulta a expressão para o cálculo do pré-esforço, em função da força exterior  $F_e$ .

$$F_i = \frac{k_l}{k_p + k_l} F_0 \quad (\text{A.17})$$

Esta equação é igual à resultante da substituição de  $F_l^f$  por zero na equação A.12.

## A.2 Seleção de rolamentos

No dimensionamento de rolamentos deve-se identificar todos os fatores que contribuem para a sua vida efetiva, perante as condições de funcionamento.

Resumidamente, o dimensionamento destes divide-se em duas partes importantes: o cálculo da carga dinâmica equivalente e a capacidade de carga dinâmica que este deve possuir.

A carga dinâmica equivalente é traduzida pela Expressão (A.18), expressão genérica,

$$P = f(X, Y, F_r, F_a) \quad (\text{A.18})$$

sendo a expressão detalhada função do tipo de rolamento, tal como os coeficiente X e Y. Por sua vez, esta assume uma configuração do género da Equação (A.19),

$$P = X.F_r + Y.F_a \quad (\text{A.19})$$

onde X e Y dependem de,

$$\frac{f_0.F_a}{C_0} \quad (\text{A.20})$$

onde:  $f_0$  é o fator que depende da série do rolamento e do índice do furo (associado a cada tipo de rolamento);  $C_0$  é a capacidade estática do rolamento;  $F_a$  é a força axial.

Todas estas variáveis são obtidas nos catálogos de rolamentos e através do conhecimento dos esforços nos apoios dos veios.

A capacidade de carga dinâmica representa a carga dinâmica admissível de um rolamento, nas suas condições de funcionamento. A abordagem a este parâmetro pode ser realizada de duas maneiras: cálculo da carga dinâmica mínima que o rolamento deve apresentar, perante umas condições de funcionamento e um número de horas pré-definido; cálculo do número de horas que

um rolamento apresenta, na presença de umas condições de funcionamento e do seu valor de carga dinâmica.

A carga dinâmica equivalente,  $P$ , relaciona-se com a capacidade dinâmica equivalente,  $C$ , através da Expressão (A.21),

$$C = \frac{P \cdot f_l}{f_n} \quad (\text{A.21})$$

A capacidade dinâmica depende do número de horas de funcionamento e da velocidade de rotação, contabilizadas pelos parâmetros  $f_l$  e  $f_n$ , com

$$f_l = \sqrt[4]{\frac{L_h}{500}} \quad (\text{A.22})$$

$$f_n = \sqrt[p]{\frac{33,333(3)}{n}} \quad (\text{A.23})$$

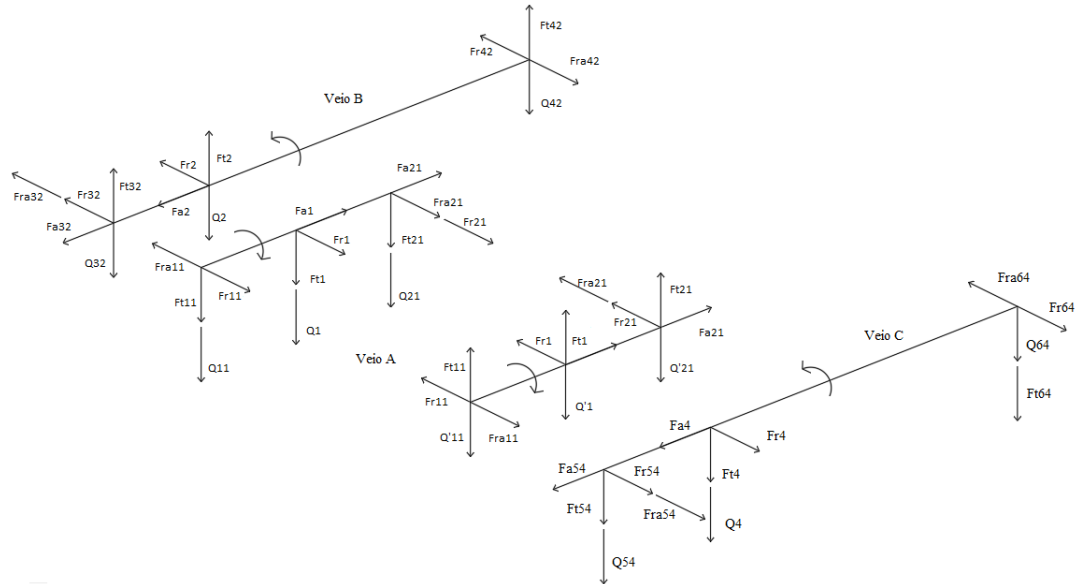
onde:  $p$  é o parâmetro do rolamento, com valor  $1/3$ , para rolamentos de esferas, e  $10/3$  para rolamentos de rolos;  $n$  é a velocidade de rotação e  $L_h$  é o número de horas de funcionamento.

Os dados apresentados dizem respeito ao cálculo da carga dinâmica equivalente e da vida nominal de um rolamento, em função do contributo da carga e da geometria. No entanto, como referido no texto principal, existem outros fatores que contribuem para estes dois parâmetros. Com estes dados, o importante é identificar o processo de cálculo aplicado pelo software para obtenção destes parâmetros que, posteriormente, serão afetados pelos restantes fatores.

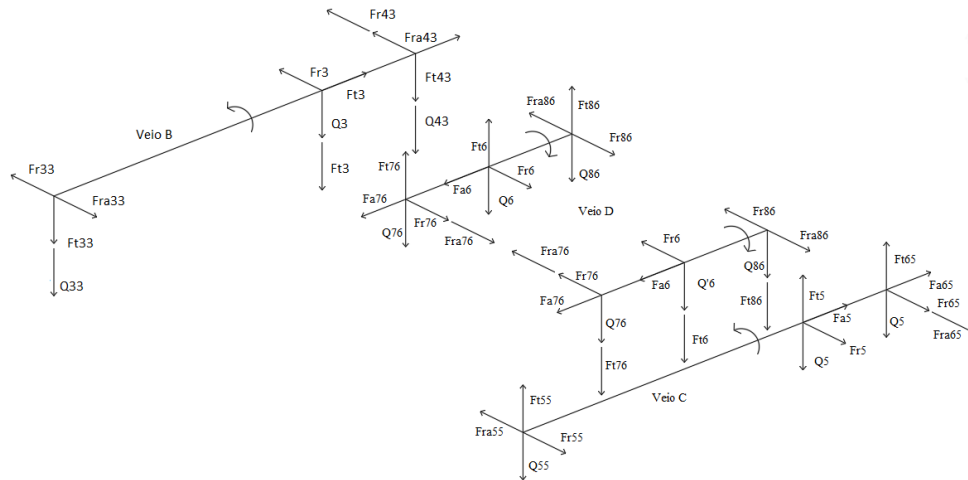
*Página intencionalmente em branco*

## B Anexo: Análise dos esforços

### B.1 Análise dos esforços da *Arquitetura Simples* no sentido horário



(a) Representação dos esforços atuantes nos veios resultante dos engrenamentos do primeiro andar.



(b) Representação dos esforços atuantes nos veios resultante dos engrenamentos do segundo andar.

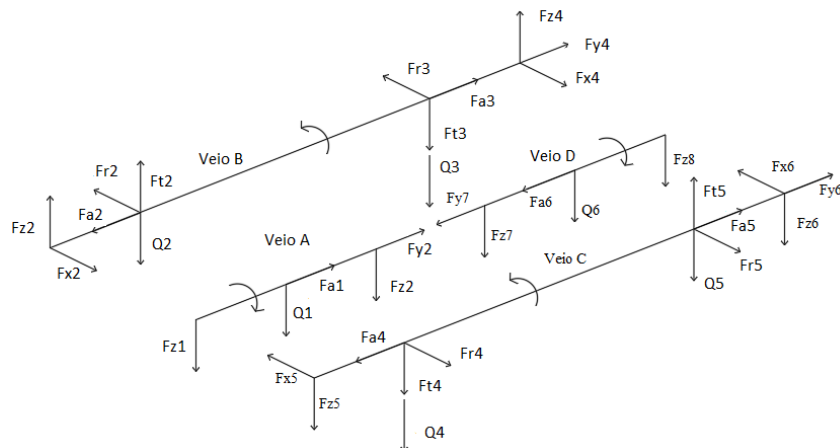
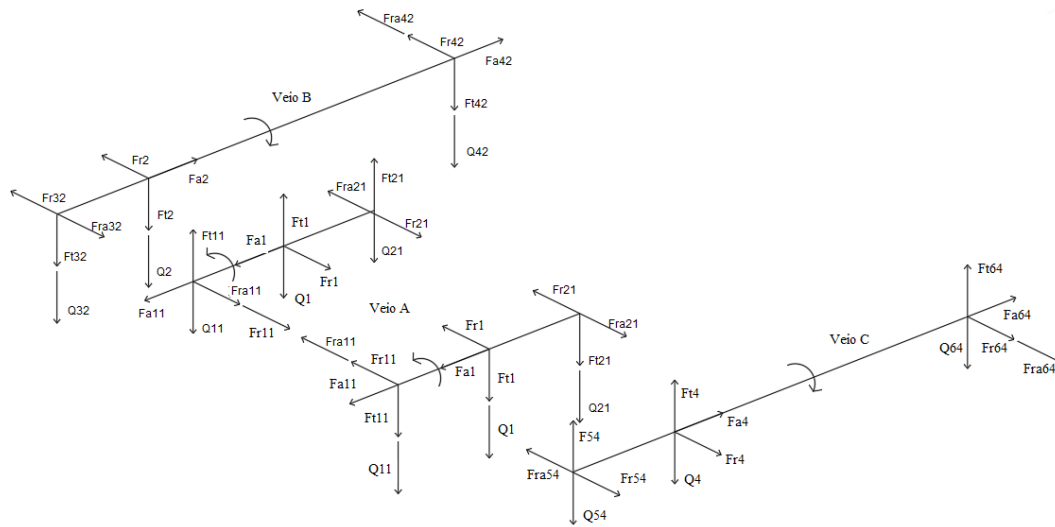
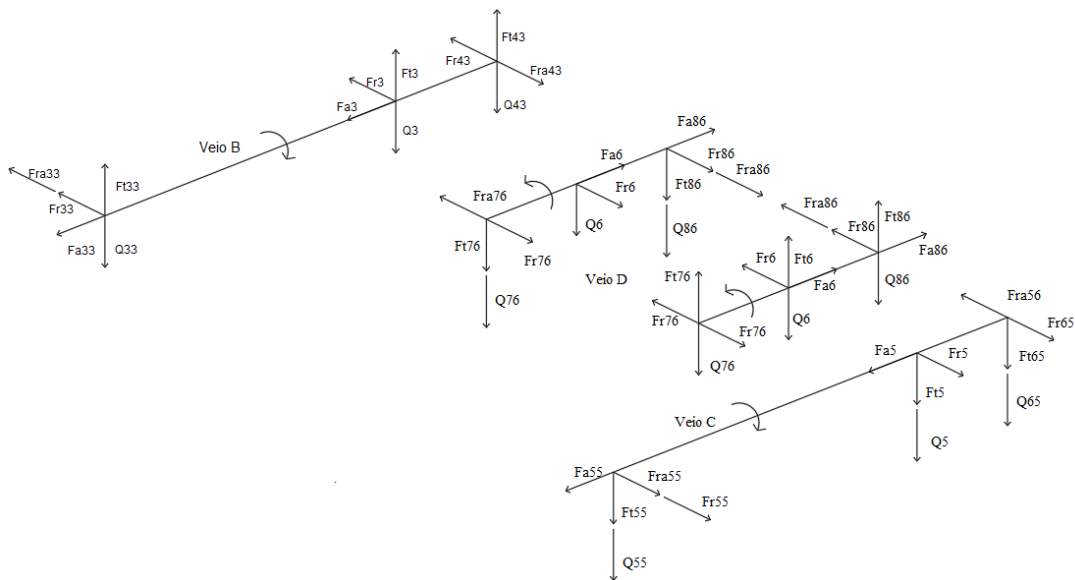


Figura 80: Representação dos esforços atuantes nos apoios na *Arquitetura Simples* com rotação no sentido horário.

## B.2 Análise dos esforços da *Arquitetura Simples* no sentido anti-horário



(a) Representação dos esforços atuantes nos veios resultante dos engrenamentos do primeiro andar.



(b) Representação dos esforços atuantes nos veios resultante dos engrenamentos do segundo andar.

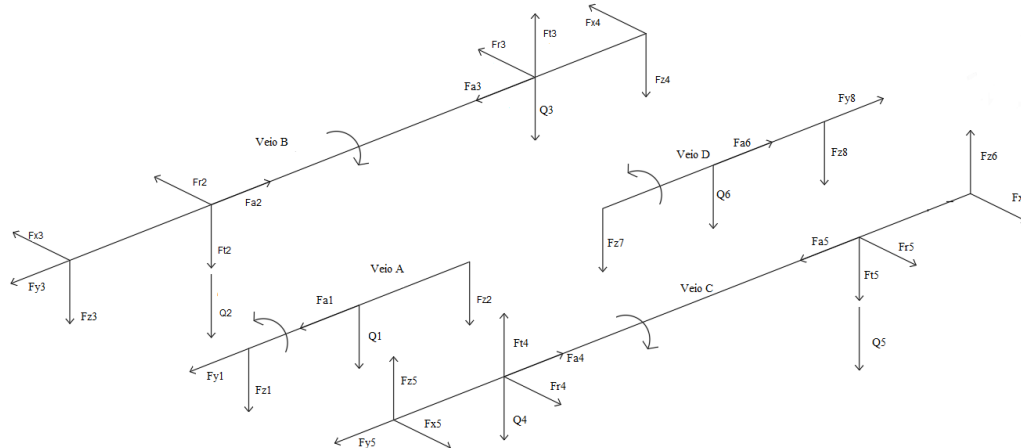
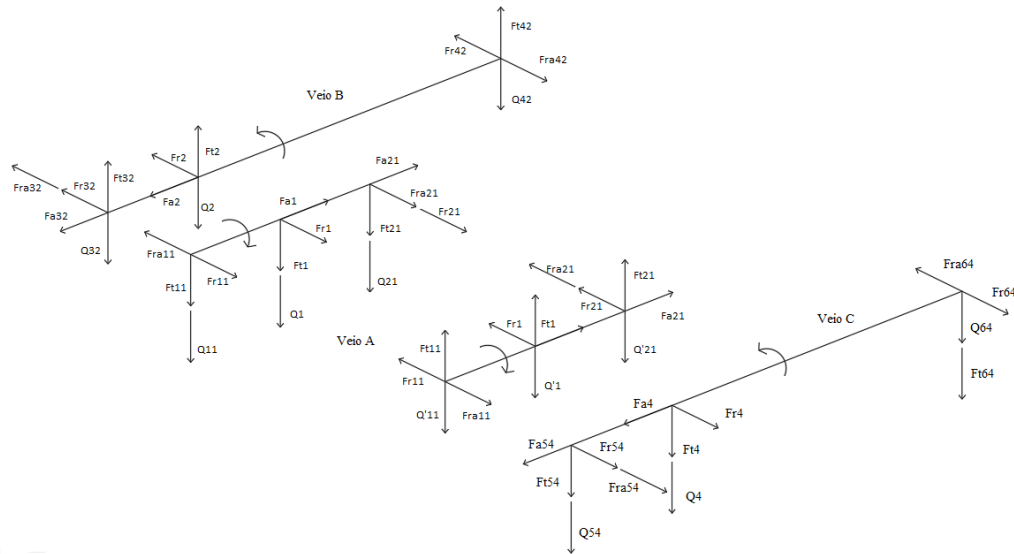
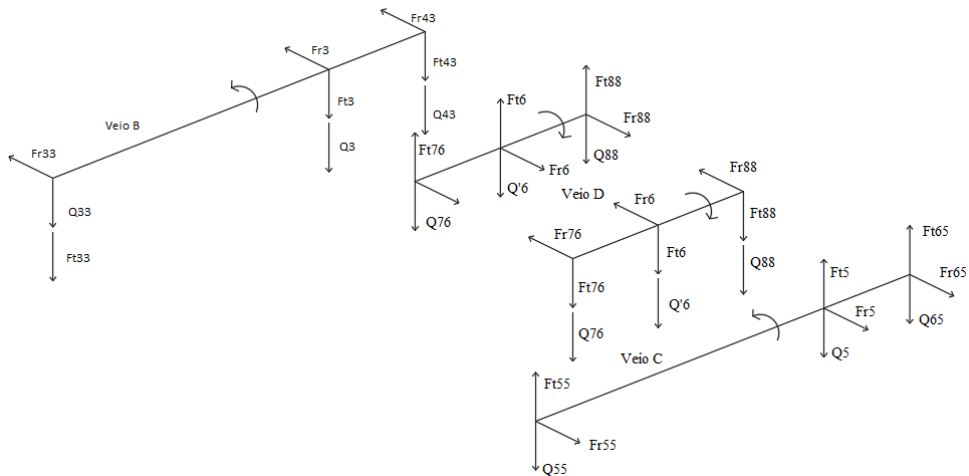


Figura 81: Representação dos esforços atuantes nos apoios na *Arquitetura Simples* com rotação no sentido anti-horário.

### B.3 Análise dos esforços da *Arquitetura Mista* no sentido horário



(a) Representação dos esforços atuantes nos veios resultante dos engrenamentos do primeiro andar.



(b) Representação dos esforços atuantes nos veios resultante dos engrenamentos do segundo andar.

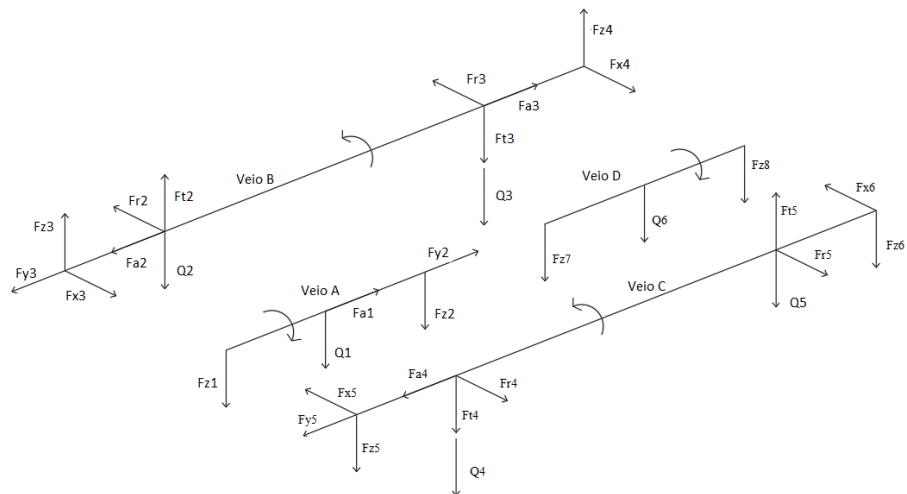


Figura 82: Representação dos esforços atuantes nos apoios da *Arquitetura Mista* com rotação no sentido horário.

*Página intencionalmente em branco*



## C Anexo: Toleranciamento dos rolamentos- *Koyo*<sup>®</sup>

Table 7-3 (1) Radial bearing tolerances (tapered roller bearings excluded)

= JIS B 1514-1 =

## (1) Inner ring (bore diameter)

| Nominal bore diameter<br><i>d</i><br>mm |       | Single plane mean bore diameter deviation |       |         |       |         |       |         |       |         |       | Single bore diameter deviation<br>$\Delta_{ds}^{1)}$ |       |         |       | Single plane            |         |         |         |  |
|---|-------|---|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|--|-------|---------|-------|-------------------------|---------|---------|---------|--|
|   |       | $\Delta_{dmp}$                            |       |         |       |         |       |         |       |         |       |  |       |         |       | Diameter series 7, 8, 9 |         |         |         |  |
|   |       | class 0                                   |       | class 6 |       | class 5 |       | class 4 |       | class 2 |       | class 4  |       | class 2 |       | class 0                 | class 6 | class 5 | class 4 |  |
| over                                    | up to | upper                                     | lower | upper   | lower | upper   | lower | upper   | lower | upper   | lower | upper  | lower | upper   | lower | max.                    |         |         |         |  |
| –                                       | 0.6   | 0   | – 8   | 0       | – 7   | 0       | – 5   | 0       | – 4   | 0       | – 2.5 | 0  | – 4   | 0       | – 2.5 | 10                      | 9       | 5       | 4       |  |
| 0.6                                     | 2.5   | 0   | – 8   | 0       | – 7   | 0       | – 5   | 0       | – 4   | 0       | – 2.5 | 0  | – 4   | 0       | – 2.5 | 10                      | 9       | 5       | 4       |  |
| 2.5                                     | 10    | 0   | – 8   | 0       | – 7   | 0       | – 5   | 0       | – 4   | 0       | – 2.5 | 0  | – 4   | 0       | – 2.5 | 10                      | 9       | 5       | 4       |  |
| 10                                      | 18    | 0   | – 8   | 0       | – 7   | 0       | – 5   | 0       | – 4   | 0       | – 2.5 | 0  | – 4   | 0       | – 2.5 | 10                      | 9       | 5       | 4       |  |
| 18                                      | 30    | 0   | – 10  | 0       | – 8   | 0       | – 6   | 0       | – 5   | 0       | – 2.5 | 0  | – 5   | 0       | – 2.5 | 13                      | 10      | 6       | 5       |  |
| 30                                      | 50    | 0   | – 12  | 0       | – 10  | 0       | – 8   | 0       | – 6   | 0       | – 2.5 | 0  | – 6   | 0       | – 2.5 | 15                      | 13      | 8       | 6       |  |
| 50                                      | 80    | 0   | – 15  | 0       | – 12  | 0       | – 9   | 0       | – 7   | 0       | – 4   | 0  | – 7   | 0       | – 4   | 19                      | 15      | 9       | 7       |  |
| 80                                      | 120   | 0   | – 20  | 0       | – 15  | 0       | – 10  | 0       | – 8   | 0       | – 5   | 0  | – 8   | 0       | – 5   | 25                      | 19      | 10      | 8       |  |
| 120                                     | 150   | 0   | – 25  | 0       | – 18  | 0       | – 13  | 0       | – 10  | 0       | – 7   | 0  | – 10  | 0       | – 7   | 31                      | 23      | 13      | 10      |  |
| 150                                     | 180   | 0   | – 25  | 0       | – 18  | 0       | – 13  | 0       | – 10  | 0       | – 7   | 0  | – 10  | 0       | – 7   | 31                      | 23      | 13      | 10      |  |
| 180                                     | 250   | 0   | – 30  | 0       | – 22  | 0       | – 15  | 0       | – 12  | 0       | – 8   | 0  | – 12  | 0       | – 8   | 38                      | 28      | 15      | 12      |  |
| 250                                     | 315   | 0   | – 35  | 0       | – 25  | 0       | – 18  | 0       | – 15  | –       | –     | 0  | – 15  | –       | –     | 44                      | 31      | 18      | 15      |  |
| 315                                     | 400   | 0   | – 40  | 0       | – 30  | 0       | – 23  | 0       | – 18  | –       | –     | 0  | – 18  | –       | –     | 50                      | 38      | 23      | 18      |  |
| 400                                     | 500   | 0   | – 45  | 0       | – 35  | 0       | – 28  | 0       | – 23  | –       | –     | 0  | – 23  | –       | –     | 56                      | 44      | 28      | 23      |  |
| 500                                     | 630   | 0   | – 50  | 0       | – 40  | 0       | – 35  | –       | –     | –       | –     | –  | –     | –       | –     | 63                      | 50      | 35      | –       |  |
| 630                                     | 800   | 0   | – 75  | 0       | – 50  | 0       | – 45  | –       | –     | –       | –     | –  | –     | –       | –     | 94                      | 63      | 45      | –       |  |
| 800                                     | 1 000 | 0   | – 100 | 0       | – 60  | 0       | – 60  | –       | –     | –       | –     | –  | –     | –       | –     | 125                     | 75      | 60      | –       |  |
| 1 000                                   | 1 250 | 0   | – 125 | 0       | – 75  | 0       | – 75  | –       | –     | –       | –     | –  | –     | –       | –     | 156                     | 94      | 75      | –       |  |
| 1 250                                   | 1 600 | 0   | – 160 | –       | –     | –       | –     | –       | –     | –       | –     | –  | –     | –       | –     | 200                     | –       | –       | –       |  |
| 1 600                                   | 2 000 | 0   | – 200 | –       | –     | –       | –     | –       | –     | –       | –     | –  | –     | –       | –     | 250                     | –       | –       | –       |  |

## (2) Inner ring (running accuracy and width)

| Nominal bore diameter<br>$d$<br>mm |       | Radial runout of assembled bearing inner ring<br>$K_{ia}$ |         |         |         |         | $S_d$   |         |         | $S_{ia}^{2)}$ |         |         | Single inner ring width<br>$\Delta_{Bs}$ |         |         |         |         |         |
|------------------------------------|-------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------|---------|---------|--|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                    |       | class 0   | class 6 | class 5 | class 4 | class 2 | class 5 | class 4 | class 2 | class 5       | class 4 | class 2 | class 0                                  |         | class 6 |         | class 5 |         |
|                                    |       | upper   | lower   | upper   | lower   | upper   | upper   | lower   | upper   | upper         | lower   | upper   | upper                                    | lower   | upper   | lower   | upper   | lower   |
| over                               | up to | max.  |         |         |         |         | max.    |         |         | max.          |         |         | upper                                    | lower   | upper   | lower   | upper   | lower   |
| –                                  | 0.6   | 10  | 5       | 4       | 2.5     | 1.5     | 7       | 3       | 1.5     | 7             | 3       | 1.5     | 0  | – 40    | 0       | – 40    | 0       | – 40    |
| 0.6                                | 2.5   | 10  | 5       | 4       | 2.5     | 1.5     | 7       | 3       | 1.5     | 7             | 3       | 1.5     | 0  | – 40    | 0       | – 40    | 0       | – 40    |
| 2.5                                | 10    | 10  | 6       | 4       | 2.5     | 1.5     | 7       | 3       | 1.5     | 7             | 3       | 1.5     | 0  | – 120   | 0       | – 120   | 0       | – 40    |
| 10                                 | 18    | 10  | 7       | 4       | 2.5     | 1.5     | 7       | 3       | 1.5     | 7             | 3       | 1.5     | 0  | – 120   | 0       | – 120   | 0       | – 80    |
| 18                                 | 30    | 13  | 8       | 4       | 3       | 2.5     | 8       | 4       | 1.5     | 8             | 4       | 2.5     | 0  | – 120   | 0       | – 120   | 0       | – 120   |
| 30                                 | 50    | 15  | 10      | 5       | 4       | 2.5     | 8       | 4       | 1.5     | 8             | 4       | 2.5     | 0  | – 120   | 0       | – 120   | 0       | – 120   |
| 50                                 | 80    | 20  | 10      | 5       | 4       | 2.5     | 8       | 5       | 1.5     | 8             | 5       | 2.5     | 0  | – 150   | 0       | – 150   | 0       | – 150   |
| 80                                 | 120   | 25  | 13      | 6       | 5       | 2.5     | 9       | 5       | 2.5     | 9             | 5       | 2.5     | 0  | – 200   | 0       | – 200   | 0       | – 200   |
| 120                                | 150   | 30  | 18      | 8       | 6       | 2.5     | 10      | 6       | 2.5     | 10            | 7       | 2.5     | 0  | – 250   | 0       | – 250   | 0       | – 250   |
| 150                                | 180   | 30  | 18      | 8       | 6       | 5       | 10      | 6       | 4       | 10            | 7       | 5       | 0  | – 250   | 0       | – 250   | 0       | – 250   |
| 180                                | 250   | 40  | 20      | 10      | 8       | 5       | 11      | 7       | 5       | 13            | 8       | 5       | 0  | – 300   | 0       | – 300   | 0       | – 300   |
| 250                                | 315   | 50  | 25      | 13      | 10      | –       | 13      | 8       | –       | 15            | 9       | –       | 0  | – 350   | 0       | – 350   | 0       | – 350   |
| 315                                | 400   | 60  | 30      | 15      | 13      | –       | 15      | 9       | –       | 20            | 12      | –       | 0  | – 400   | 0       | – 400   | 0       | – 400   |
| 400                                | 500   | 65  | 35      | 20      | 15      | –       | 18      | 11      | –       | 25            | 15      | –       | 0  | – 450   | 0       | – 450   | 0       | – 450   |
| 500                                | 630   | 70  | 40      | 25      | –       | –       | 25      | –       | –       | 30            | –       | –       | 0  | – 500   | 0       | – 500   | 0       | – 500   |
| 630                                | 800   | 80  | 50      | 30      | –       | –       | 30      | –       | –       | 35            | –       | –       | 0  | – 750   | 0       | – 750   | 0       | – 750   |
| 800                                | 1 000 | 90  | 60      | 40      | –       | –       | 40      | –       | –       | 45            | –       | –       | 0  | – 1 000 | 0       | – 1 000 | 0       | – 1 000 |
| 1 000                              | 1 250 | 100   | 70      | 50      | –       | –       | 50      | –       | –       | 60            | –       | –       | 0  | – 1 250 | 0       | – 1 250 | 0       | – 1 250 |
| 1 250                              | 1 600 | 120   | –       | –       | –       | –       | –       | –       | –       | –             | –       | –       | 0  | – 1 600 | –       | –       | –       | –       |
| 1 600                              | 2 000 | 140   | –       | –       | –       | –       | –       | –       | –       | –             | –       | –       | 0  | – 2 000 | –       | –       | –       | –       |

 $S_d$  : perpendicularity of inner ring face with respect to the bore  $S_{ia}$  : axial runout of assembled bearing inner ring

[Notes] 1) These shall be applied to bearings of diameter series 0, 1, 2, 3 and 4.

2) These shall be applied to deep groove ball bearings and angular contact ball bearings.

Table 7-5 (2) Tolerances for metric series tapered roller bearings

## (3) Assembled bearing width and effective width

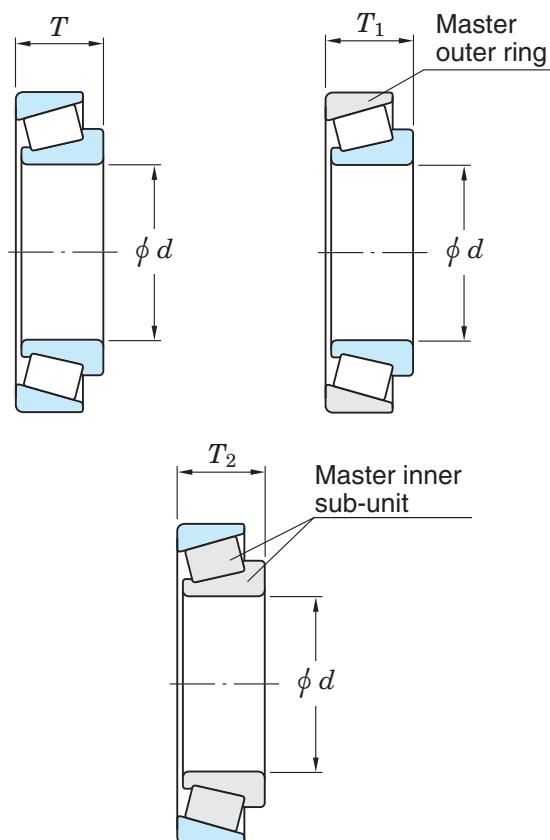
Unit :  $\mu\text{m}$ 

| Nominal bore diameter<br>$d$<br>mm |       | Actual bearing width deviation<br>$\Delta_{Ts}$ |       |          |       |         |                    |              |                    |         |       | Actual effective inner sub-unit width deviation<br>$\Delta_{T1s}$ |       |          |       |              |                    |         |       |
|------------------------------------|-------|---|-------|----------|-------|---------|--------------------|--------------|--------------------|---------|-------|---|-------|----------|-------|--------------|--------------------|---------|-------|
|                                    |       | class 0   |       | class 6X |       | class 6 |                    | classes 5, 4 |                    | class 2 |       | class 0   |       | class 6X |       | classes 5, 4 |                    | class 2 |       |
|                                    |       | upper   | lower | upper    | lower | upper   | lower              | upper        | lower              | upper   | lower | upper   | lower | upper    | lower | upper        | lower              | upper   | lower |
| —                                  | 10    | +200  | 0     | +100     | 0     | —       | —                  | +200         | —200               | +200    | —200  | +100  | 0     | +50      | 0     | +100         | —100               | +100    | —100  |
| 10                                 | 18    | +200  | 0     | +100     | 0     | +200    | 0                  | +200         | —200               | +200    | —200  | +100  | 0     | +50      | 0     | +100         | —100               | +100    | —100  |
| 18                                 | 30    | +200  | 0     | +100     | 0     | +200    | 0                  | +200         | —200               | +200    | —200  | +100  | 0     | +50      | 0     | +100         | —100               | +100    | —100  |
| 30                                 | 50    | +200  | 0     | +100     | 0     | +200    | 0                  | +200         | —200               | +200    | —200  | +100  | 0     | +50      | 0     | +100         | —100               | +100    | —100  |
| 50                                 | 80    | +200  | 0     | +100     | 0     | +200    | 0                  | +200         | —200               | +200    | —200  | +100  | 0     | +50      | 0     | +100         | —100               | +100    | —100  |
| 80                                 | 120   | +200  | —200  | +100     | 0     | +200    | —200               | +200         | —200               | +200    | —200  | +100  | —100  | +50      | 0     | +100         | —100               | +100    | —100  |
| 120                                | 180   | +350  | —250  | +150     | 0     | +350    | —250               | +350         | —250               | +200    | —250  | +150  | —150  | +50      | 0     | +150         | —150               | +100    | —100  |
| 180                                | 250   | +350  | —250  | +150     | 0     | +350    | —250               | +350         | —250               | +200    | —300  | +150  | —150  | +50      | 0     | +150         | —150               | +100    | —150  |
| 250                                | 315   | +350  | —250  | +200     | 0     | +350    | —250               | +350         | —250               | +200    | —300  | +150  | —150  | +100     | 0     | +150         | —150               | +100    | —150  |
| 315                                | 400   | +400  | —400  | +200     | 0     | +400    | —400 <sup>1)</sup> | +400         | —400 <sup>1)</sup> | —       | —     | +200  | —200  | +100     | 0     | +200         | —200 <sup>1)</sup> | —       | —     |
| 400                                | 500   | +450  | —450  | +200     | 0     | +400    | —400               | +450         | —450 <sup>1)</sup> | —       | —     | +225  | —225  | +100     | 0     | +225         | —225 <sup>1)</sup> | —       | —     |
| 500                                | 630   | +500  | —500  | —        | —     | +500    | —500               | +500         | —500 <sup>1)</sup> | —       | —     | —   | —     | —        | —     | —            | —                  | —       | —     |
| 630                                | 800   | +600  | —600  | —        | —     | +600    | —600               | +600         | —600 <sup>1)</sup> | —       | —     | —   | —     | —        | —     | —            | —                  | —       | —     |
| 800                                | 1 000 | +750  | —750  | —        | —     | +750    | —750               | +750         | —750 <sup>1)</sup> | —       | —     | —   | —     | —        | —     | —            | —                  | —       | —     |

| Nominal bore diameter<br>$d$<br>mm |       | Actual effective outer ring width deviation<br>$\Delta_{T2s}$ |       |          |       |              |                    |         |       |
|------------------------------------|-------|---|-------|----------|-------|--------------|--------------------|---------|-------|
|                                    |       | class 0   |       | class 6X |       | classes 5, 4 |                    | class 2 |       |
|                                    |       | upper   | lower | upper    | lower | upper        | lower              | upper   | lower |
| —                                  | 10    | +100  | 0     | +50      | 0     | +100         | —100               | +100    | —100  |
| 10                                 | 18    | +100  | 0     | +50      | 0     | +100         | —100               | +100    | —100  |
| 18                                 | 30    | +100  | 0     | +50      | 0     | +100         | —100               | +100    | —100  |
| 30                                 | 50    | +100  | 0     | +50      | 0     | +100         | —100               | +100    | —100  |
| 50                                 | 80    | +100  | 0     | +50      | 0     | +100         | —100               | +100    | —100  |
| 80                                 | 120   | +100  | —100  | +50      | 0     | +100         | —100               | +100    | —100  |
| 120                                | 180   | +200  | —100  | +100     | 0     | +200         | —100               | +100    | —150  |
| 180                                | 250   | +200  | —100  | +100     | 0     | +200         | —100               | +100    | —150  |
| 250                                | 315   | +200  | —100  | +100     | 0     | +200         | —100               | +100    | —150  |
| 315                                | 400   | +200  | —200  | +100     | 0     | +200         | —200 <sup>1)</sup> | —       | —     |
| 400                                | 500   | +225  | —225  | +100     | 0     | +225         | —225 <sup>1)</sup> | —       | —     |
| 500                                | 630   | —   | —     | —        | —     | —            | —                  | —       | —     |
| 630                                | 800   | —   | —     | —        | —     | —            | —                  | —       | —     |
| 800                                | 1 000 | —   | —     | —        | —     | —            | —                  | —       | —     |

[Note] 1) These shall be applied to bearings of tolerance class 5.

[Remark] Values in Italics are prescribed in JTEKT standards.


 $d$  : nominal bore diameter

 $T$  : nominal assembled bearing width

 $T_1$  : nominal effective width of inner sub-unit

 $T_2$  : nominal effective width of outer ring

## 9. Bearing fits

### 9-1 Purpose of fit

The purpose of fit is to securely fix the inner or outer ring to the shaft or housing, to preclude detrimental circumferential sliding on the fitting surface.

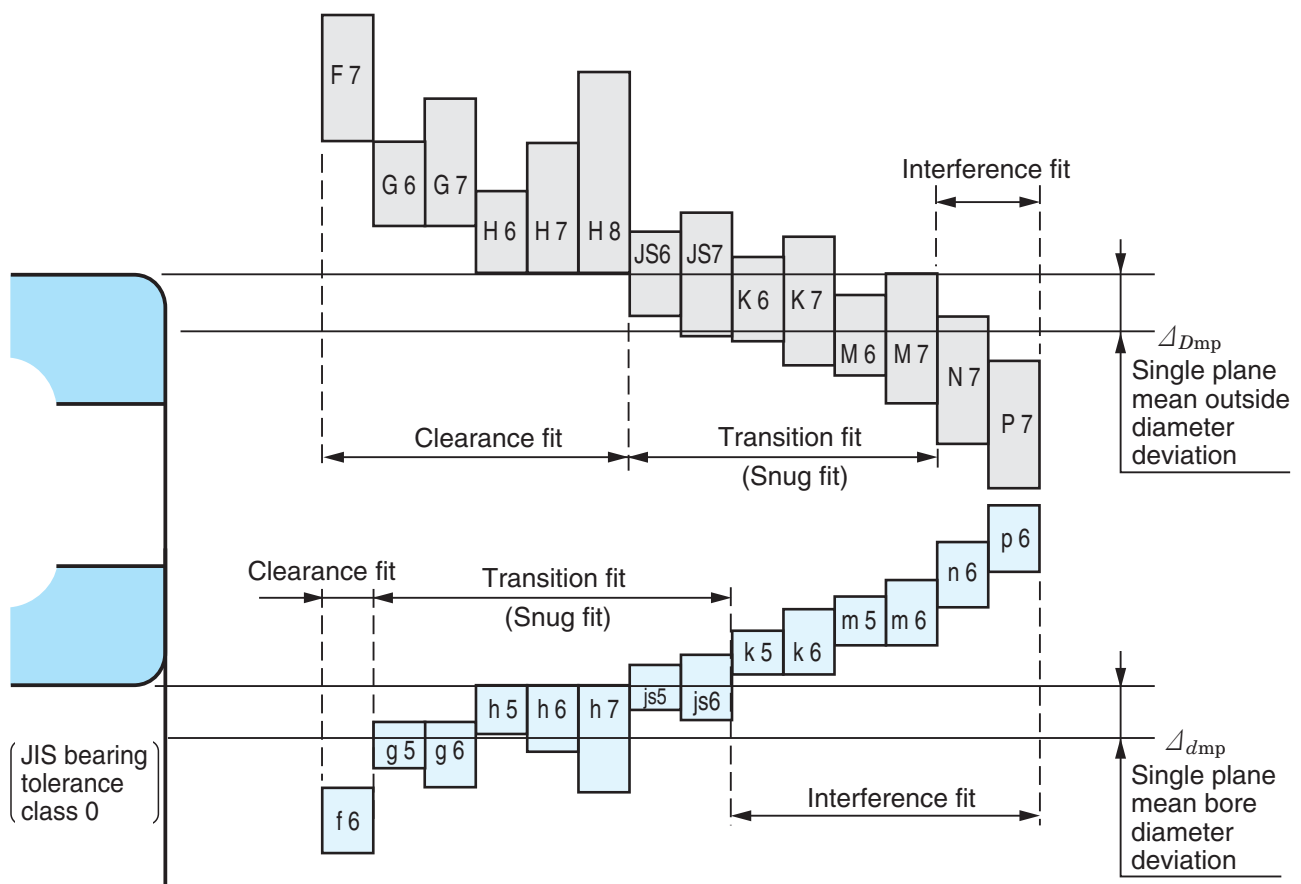
Such detrimental sliding (referred to as "creep") will cause abnormal heat generation, wear of the fitting surface, infiltration of abrasion metal particles into the bearing, vibration, and many other harmful effects, which cause a deterioration of bearing functions.

Therefore, it is necessary to fix the bearing ring which is rotating under load to the shaft or housing with interference.

### 9-2 Tolerance and fit for shaft & housing

For metric series bearings, tolerances for the shaft diameter and housing bore diameter are standardized in JIS B 0401-1 and 0401-2 "ISO system of limits and fits - Part 1 and Part 2" (based on ISO 286; shown in Appendixes at the back of this catalogue). Bearing fits on the shaft and housing are determined based on the tolerances specified in the above standard.

Fig. 9-1 shows the relationship between tolerances for shaft and housing bore diameters and fits for bearings of class 0 tolerance.



**Fig. 9-1 Relationship between tolerances for shaft/housing bore diameters and fits (bearings of class 0 tolerance)**

### 9-3 Fit selection

In selecting the proper fit, careful consideration should be given to bearing operating conditions.

Major specific considerations are :

- Load characteristics and magnitude
- Temperature distribution in operating
- Bearing internal clearance
- Surface finish, material and thickness of shaft and housing
- Mounting and dismounting methods
- Necessity to compensate for shaft thermal expansion at the fitting surface
- Bearing type and size

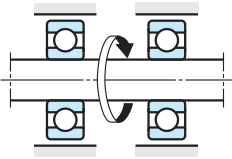
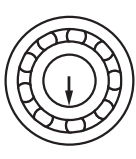
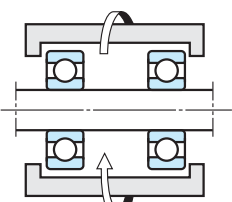
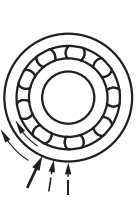
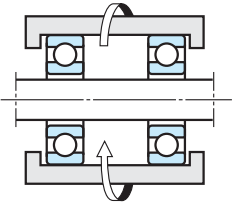
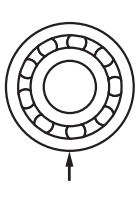
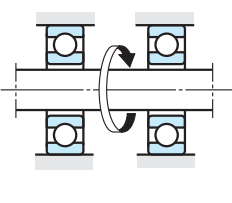

In view of these considerations, the following paragraphs explain the details of the important factors in fit selection.

#### 1) Load characteristics

Load characteristics are classified into three types : rotating inner ring load; rotating outer ring load and indeterminate direction load.

Table 9-1 tabulates the relationship between these characteristics and fit.

**Table 9-1 Load characteristics and fits**

| Rotation pattern   | Direction of load   | Loading conditions           | Fit                        |                            | Typical application                            |
|--|---|------------------------------|----------------------------|----------------------------|--|
|  |   |                              | Inner ring & shaft         | Outer ring & housing       |  |
|  <p>Inner ring : rotating<br/>Outer ring : stationary</p> |  <p>Stationary</p>                 | Rotating inner ring load     | Interference fit necessary | Clearance fit acceptable   | Spur gear boxes, motors                        |
|  <p>Inner ring : stationary<br/>Outer ring : rotating</p> |  <p>Rotating (with outer ring)</p> | Stationary outer ring load   | (k, m, n, p, r)            | (F, G, H, JS)              | Greatly unbalanced wheels                      |
|  <p>Inner ring : stationary<br/>Outer ring : rotating</p> |  <p>Stationary</p>                 | Stationary inner ring load   | Clearance fit acceptable   | Interference fit necessary | Running wheels & pulleys with stationary shaft |
|  <p>Inner ring : rotating<br/>Outer ring : stationary</p> |  <p>Rotating (with inner ring)</p> | Rotating outer ring load     | (f, g, h, js)              | (K, M, N, P)               | Shaker screens (unbalanced vibration)          |
| Indeterminate  | Rotating or stationary  | Indeterminate direction load | Interference fit           | Interference fit           | Cranks   |

## 9-4 Recommended fits

As described in Section 9-3, the characteristics / magnitude of the bearing load, temperature, mounting / dismounting methods and other conditions must be considered to choose proper fits.

Past experience is also valuable.

Table 9-3 shows standard fits for the metric series bearings; Tables 9-4 to 9-8 tabulate the most typical and recommended fits for different bearings types.

**Table 9-3 Standard fits for metric series bearings <sup>1)</sup>**

**(1) Fits for bore diameter <sup>2)</sup> of radial bearings**

| Class of bearing | Rotating inner ring load or indeterminate direction load |     |     |            |            |                |     | Stationary inner ring load |            |               |
|------------------|--|-----|-----|------------|------------|----------------|-----|----------------------------|------------|---------------|
|                  | Class of shaft tolerance range                           |     |     |            |            |                |     |                            |            |               |
| Classes 0, 6X, 6 | r 6  | p 6 | n 6 | m 6<br>m 5 | k 6<br>k 5 | js 6<br>js 5   | h 5 | h 6<br>h 5                 | g 6<br>g 5 | f 6           |
| Class 5          | –  | –   | –   | m 5        | k 4        | js 4           | h 4 | h 5                        | –          | –             |
| Fit              | Interference fit   |     |     |            |            | Transition fit |     |                            |            | Clearance fit |

**(2) Fits for outside diameter <sup>2)</sup> of radial bearings**

| Class of bearing | Stationary outer ring load            |            |                |     | Indeterminate direction load or rotating outer ring load |            |            |            |                  |
|------------------|---------------------------------------|------------|----------------|-----|--|------------|------------|------------|------------------|
|                  | Class of housing bore tolerance range |            |                |     |  |            |            |            |                  |
| Classes 0, 6X, 6 | G 7                                   | H 7<br>H 6 | JS 7<br>JS 6   | –   | JS 7<br>JS 6   | K 7<br>K 6 | M 7<br>M 6 | N 7<br>N 6 | P 7              |
| Class 5          | –                                     | H 5        | JS 5           | K 5 | –  | K 5        | M 5        | –          | –                |
| Fit              | Clearance fit                         |            | Transition fit |     |  |            |            |            | Interference fit |

**(3) Fits for bore diameter <sup>2)</sup> of thrust bearings**

| Class of bearing | Central axial load<br>(generally for thrust bearings) |     | Combined load (in the case of spherical thrust roller bearing) |     |                               |                |
|------------------|---|-----|--|-----|-------------------------------|----------------|
|                  |   |     | Rotating shaft race load or<br>indeterminate direction load    |     | Stationary shaft<br>race load |                |
|                  | Class of shaft tolerance range                        |     |  |     |                               |                |
| Classes 0, 6     | js 6  | h 6 | n 6  | m 6 | k 6                           | js 6           |
| Fit              | Transition fit  |     | Interference fit   |     |                               | Transition fit |

**(4) Fits for outside diameter <sup>2)</sup> of thrust bearings**

| Class of bearing | Central axial load<br>(generally for thrust bearings) |     | Combined load (in the case of spherical thrust roller bearing)  |     |                               |     |     |
|------------------|---|-----|---|-----|-------------------------------|-----|-----|
|                  |   |     | Stationary housing race load or<br>indeterminate direction load |     | Rotating housing<br>race load |     |     |
|                  | Class of housing bore tolerance range                 |     |   |     |                               |     |     |
| Classes 0, 6     | –   | H 8 | G 7   | H 7 | JS 7                          | K 7 | M 7 |
| Fit              | Clearance fit   |     |   |     | Transition fit                |     |     |

[Notes] 1) Bearings specified in JIS B 1512

2) Follow JIS B 1514-1 and 1514-2 for tolerance.

Table 9-4 (1) Recommended shaft fits for radial bearings (classes 0, 6X, 6)

| Conditions <sup>1)</sup>   |  | Ball bearing        |       | Cylindrical roller bearing<br>Tapered roller bearing |       | Spherical roller bearing |       | Class of shaft tolerance range                 | Remarks   | Applications (for reference)   |
|--|--|---------------------|-------|--|-------|--------------------------|-------|--|---|--|
|  |  | Shaft diameter (mm) |       |  |       |                          |       |  |   |  |
|  |  | over                | up to | over   | up to | over                     | up to |  |   |  |
| Cylindrical bore bearing (classes 0, 6X, 6)                        |  |                     |       |  |       |                          |       |  |   |  |
| Rotating inner ring load or indeterminate direction load           | Light load or fluctuating load<br>$\left(\frac{P_r}{C_r} \leq 0.06\right)$ | —                   | 18    | —  | —     | —                        | —     | h 5<br>js 6<br>k 6<br>m 6                      | For applications requiring high accuracy, js 5,k 5 and m 5 should be used in place of js 6, k 6 and m 6.  | Electric appliances, machine tools, pumps, blowers, carriers etc.                  |
|  | Normal load<br>$\left(0.06 < \frac{P_r}{C_r} \leq 0.12\right)$             | —                   | 18    | —  | —     | —                        | —     | js 5<br>k 5<br>m 5<br>m 6<br>n 6<br>p 6<br>r 6 | For single-row tapered roller bearings and angular contact ball bearings, k 5 and m 5 may be replaced by k 6 and m 6, because internal clearance reduction due to fit need not be considered. | Electric motors, turbines, internal combustion engines, wood-working machines etc. |
|  | Heavy load or impact load<br>$\left(\frac{P_r}{C_r} > 0.12\right)$         | —                   | —     | 50   | 140   | 50                       | 100   | n 6<br>p 6<br>r 6                              | Bearings with larger internal clearance than standard are required.   | Railway rolling stock axle journals, traction motors                               |
|  |  |                     |       |  |       |                          |       |  |   |  |
| Stationary inner ring load   | Inner ring needs to move smoothly on shaft.                                | All shaft diameters |       |  |       |                          |       | g 6  | For applications requiring high accuracy, g 5 should be used. For large size bearing, f 6 may be used for easier movement.  | Stationary shaft wheels  |
|  | Inner ring does not need to move smoothly on shaft.                        | All shaft diameters |       |  |       |                          |       | h 6  | For applications requiring high accuracy, h 5 should be used.   | Tension pulleys, rope sheaves etc.   |
| Central axial load only  |  | All shaft diameters |       |  |       |                          |       | js 6   | —   | —  |
| Tapered bore bearing (class 0) (with adapter or withdrawal sleeve) |  |                     |       |  |       |                          |       |  |   |  |
| All loads  |  | All shaft diameters |       |  |       |                          |       | h 9/IT 5 <sup>2)</sup>                         | For transmission shafts, h 10/IT 7 <sup>2)</sup> may be applied.  |  |

[Notes] 1) Light, normal, and heavy loads refer to those with dynamic equivalent radial loads ( $P_r$ ) of 6 % or lower, over 6 % up to 12 % inclusive, and over 12 % respectively in relation to the basic dynamic radial load rating ( $C_r$ ) of the bearing concerned.

2) IT 5 and IT 7 mean that shaft roundness tolerance, cylindricity tolerance, and other errors in terms of shape should be within the tolerance range of IT 5 and IT 7, respectively. For numerical values for standard tolerance grades IT 5 and IT 7, refer to supplementary table at end of this catalog.

[Remark] This table is applicable to solid steel shafts.

Table 9-4 (2) Recommended housing fits for radial bearings (classes 0, 6X, 6)

| Conditions              |                              |   |   | Class of housing bore tolerance range | Remarks   | Applications (for reference)  |
|-------------------------|------------------------------|---|---|---------------------------------------|---|---|
| Housing                 | Load type etc. <sup>1)</sup> |   | Outer ring axial displacement <sup>2)</sup> |                                       |   |   |
| One-piece or split type | Stationary outer ring load   | All load types  | Easily displaceable                         | H 7                                   | G 7 may be applied when a large size bearing is used, or if the temperature difference is large between the outer ring and housing. | Ordinary bearing devices, railway rolling stock axle boxes, power transmission equipment etc. |
|                         |                              | Light or normal load                                  |   | H 8                                   | —   |   |
|                         |                              | High temperature at shaft and inner ring              |   | G 7                                   | F 7 may be applied when a large size bearing is used, or if the temperature difference is large between the outer ring and housing. | Drying cylinders etc.   |
| One-piece type          |                              | Light or normal load, requiring high running accuracy | Not displaceable in principle               | K 6                                   | Mainly applied to roller bearings.  |   |
|                         |                              |   | Displaceable                                | JS 6                                  | Mainly applied to ball bearings.  |   |
|                         |                              | Requiring low-noise rotation                          | Easily displaceable                         | H 6                                   | —   |   |
|                         | Indeterminate direction load | Light or normal load                                  | Normally displaceable                       | JS 7                                  | For applications requiring high accuracy, JS 6 and K 6 should be used in place of JS 7 and K 7.                                     | Electric motors, pumps, crankshaft main bearings etc.   |
|                         |                              | Normal or heavy load                                  | Not displaceable in principle               | K 7                                   |   |   |
|                         |                              | High impact load                                      | Not displaceable                            | M 7                                   | —   | Traction motors etc.  |
|                         | Rotating outer ring load     | Light or fluctuating load                             | Not displaceable                            | M 7                                   | —   | Conveyor rollers, ropeways, tension pulleys etc.  |
|                         |                              | Normal or heavy load                                  |   | N 7                                   | Mainly applied to ball bearings.  | Wheel hubs with ball bearings etc.  |
|                         |                              | Thin section housing, heavy or high impact load       |   | P 7                                   | Mainly applied to roller bearings.  | Wheel hubs with roller bearings, bearings for large end of connecting rods etc.               |

[Notes] 1) Loads are classified as stated in Note 1) to Table 9-4 (1).

2) Indicating distinction between applications of non-separable bearings permitting and not permitting axial displacement of the outer rings.

[Remarks] 1. This table is applicable to cast iron or steel housings.

2. If only central axial load is applied to the bearing, select such tolerance range class as to provide clearance in the radial direction for outer ring.



## D Anexo: Relatório do dimensionamento do redutor - *KISS-sys*<sup>®</sup>

### D.1 Engrenamentos e análise estrutural

## Engrenamento z1/z2 (Andar 1)

KISSsoft Release 03/2017 F

KISSsoft University license - Universidade do Porto

### Arquivo

Nome : Mauro Filipe Rodrigues Domingues

Modificado por: up201404793

Data: Junho 2019

Hora: -

## CÁLCULO DE UM PAR DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES OBLÍQUOS

Número no desenho ou artigo:

Engrenagem 1: z1

Engrenagem 2: z2

Método de cálculo DIN 3990:1987 Método B

### ----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --

|  |      |          |        |
|--|------|----------|--------|
| Potência (kW)                                      | [P]  | 187.500  |        |
| Velocidade (1/min)                                 | [n]  | 1000.0   | 225.6  |
| Torque (Nm)  | [T]  | 1790.5   | 7937.9 |
| Fator de aplicação                                 | [KA] |          | 1.60   |
| Vida útil exigida (h)                              | [H]  | 20000.00 |        |
| Engrenagem em acionamento (+)/acionada (-)         |      | +        | -      |
| Flanco de trabalho da engrenagem 1: Flanco direito |      |          |        |
| Sentido de rotação engrenagem 1 no sentido horário |      |          |        |

### 1. GEOMETRIA E MATERIAL DOS DENTES

(Cálculo da geometria em conformidade com ISO 21771:2007, DIN ISO 21771)

### ----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --

|   |                         |         |          |
|---|-------------------------|---------|----------|
| Distância entre eixos (mm)                    | [a]                     | 424.000 |          |
| Tolerância de distância entre eixos           | ISO 286:2010 Desvio js7 |         |          |
| Módulo normal (mm)                            | [mn]                    | 5.0000  |          |
| Ângulo de pressão na seção normal (°)         | [alfn]                  | 20.0000 |          |
| ângulo de hélice no círculo de referência (°) | [beta]                  | 15.0000 |          |
| Número de dentes                              | [z]                     | 30      | 133      |
| Largura de dente (mm)                         | [b]                     | 60.70   | 60.70    |
| Sentido de inclinação                         |                         | direita | esquerda |
| Qualidade de engrenagem                       | [Q-DIN 3961:1978]       | 6       | 6        |
| Diâmetro interno (mm)                         | [di]                    | 86.00   | 490.00   |
| Diâmetro interno do aro (mm)                  | [dbi]                   | 0.00    | 0.00     |

Material

|            |    |   |
|------------|----|---|
| Engrenagem | 1: | 18CrNiMo7-6, Aço de cementação, endurecido por cementação                 |
|            |    | ISO 6336-5 Figura 9/10 (MQ), Dureza do núcleo >=25HRC Jominy J=12mm<HRC28 |
| Engrenagem | 2: | 36 CrNiMo 4 (2), Aço beneficiado, temperado à chama/por ind.              |
|            |    | ISO 6336-5 Figura 11/12 (MQ) Flanco e pé endurecidos                      |

### ----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --

|  |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|
| Dureza superficial                           |         | HRC 61  | HRC 56  |
| Resist. fadiga Tensão no pé do dente (N/mm²) | [σFlim] | 430.00  | 370.00  |
| Resistência fad. Pressão hertziana (N/mm²)   | [σHlim] | 1500.00 | 1220.00 |
| Resistência à ruptura (N/mm²)                | [σB]    | 1200.00 | 1100.00 |
| Limite de elasticidade (N/mm²)               | [σS]    | 850.00  | 900.00  |

|  |       |        |        |
|--|-------|--------|--------|
| Módulo de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )            | [E]   | 206000 | 206000 |
| Número de Poisson                                      | [ν]   | 0.300  | 0.300  |
| Valor de rugosidade médio Ra, flanco (μm)              | [RAH] | 0.60   | 0.60   |
| Valor de rugosidade médio Ra, pé (μm)                  | [RAF] | 3.00   | 3.00   |
| Profundidade da rugosidade Rz determinada, flanco (μm) | [RZH] | 4.80   | 4.80   |
| Profundidade da rugosidade Rz determinada, pé (μm)     | [RZF] | 20.00  | 20.00  |

Perfil de referência da engrenagem

1 :

|   |  |                         |  |
|---|--|-------------------------|--|
| Perfil de referência                    | 1.25 / 0.38 / 1.0 ISO 53:1998 Perfil A |                         |  |
| Fator de altura do pé                   | [hfP*]                                 | 1.250                   |  |
| Fator do raio do pé                     | [rhofP*]                               | 0.380 (rhofPmax*=0.472) |  |
| Fator de altura da cabeça               | [haP*]                                 | 1.000                   |  |
| Fator de raio da cabeça                 | [rhoaP*]                               | 0.000                   |  |
| Coefficiente de altura de protuberância | [hprP*]                                | 0.000                   |  |
| Ângulo da protuberância                 | [alfprP]                               | 0.000                   |  |
| Fator de altura da forma da cabeça      | [hFaP*]                                | 0.000                   |  |
| Ângulo de flanco de chanfro             | [alfKP]                                | 0.000                   |  |

não sobreposto

Perfil de referência da engrenagem

2 :

|   |  |                         |  |
|---|--|-------------------------|--|
| Perfil de referência                    | 1.25 / 0.38 / 1.0 ISO 53:1998 Perfil A |                         |  |
| Fator de altura do pé                   | [hfP*]                                 | 1.250                   |  |
| Fator do raio do pé                     | [rhofP*]                               | 0.380 (rhofPmax*=0.472) |  |
| Fator de altura da cabeça               | [haP*]                                 | 1.000                   |  |
| Fator de raio da cabeça                 | [rhoaP*]                               | 0.000                   |  |
| Coefficiente de altura de protuberância | [hprP*]                                | 0.000                   |  |
| Ângulo da protuberância                 | [alfprP]                               | 0.000                   |  |
| Fator de altura da forma da cabeça      | [hFaP*]                                | 0.000                   |  |
| Ângulo de flanco de chanfro             | [alfKP]                                | 0.000                   |  |

não sobreposto

Resumo perfil de referência das engrenagens:

|   |          |       |       |
|---|----------|-------|-------|
| Perfil de referência da altura do pé    | [hfP*]   | 1.250 | 1.250 |
| Raio do pé, perfil de referência        | [rofP*]  | 0.380 | 0.380 |
| Altura da cabeça perfil de referência   | [haP*]   | 1.000 | 1.000 |
| Coefficiente de altura de protuberância | [hprP*]  | 0.000 | 0.000 |
| Ângulo da protuberância (°)             | [alfprP] | 0.000 | 0.000 |
| Fator de altura da forma da cabeça      | [hFaP*]  | 0.000 | 0.000 |
| Ângulo de flanco de chanfro (°)         | [alfKP]  | 0.000 | 0.000 |

Tipo de correção de perfil: para transmissão de alta capaci

|                     |      |      |      |
|---------------------|------|------|------|
| Reco da cabeça (μm) | [Ca] | 28.0 | 28.0 |
|---------------------|------|------|------|

|  |                                       |        |  |
|--|---------------------------------------|--------|--|
| Tipo de lubrificação   | Lubrificação por imersão em óleo      |        |  |
| Tipos de óleo (Entrada própria)                                      | Entrada própria                       |        |  |
| Base de lubrificante   | Óleo sintético com base de poliglicol |        |  |
| Óleo de base a 40 graus viscos. nominal cinem. (mm <sup>2</sup> /s)  |                                       |        |  |
|  | [nu40]                                | 150.00 |  |
| Óleo de base a 100 graus viscos. nominal cinem. (mm <sup>2</sup> /s) |                                       |        |  |
|  | [nu100]                               | 18.00  |  |
| Espessura esp. a 15 graus (kg/dm <sup>3</sup> )                      | [roOil]                               | 0.870  |  |
| Temperatura de óleo (°C)   | [TS]                                  | 60.000 |  |

|  |                    | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 --   |
|--|--------------------|--------------------------|-------------------|
| Transmissão total  | [itot]             | -4.433                   |                   |
| Relação do número de dentes                                  | [u]                | 4.433                    |                   |
| Módulo transversal (mm)                                      | [mt]               | 5.176                    |                   |
| Ângulo de pressão no círculo de referência (°)               | [alft]             | 20.647                   |                   |
| Ângulo de pressão  |                    |                          |                   |
| Ângulo de pressão de operação (°)                            | [alftw]            | 21.396                   |                   |
|  | [alftw.e/i]        | 21.407 /                 | 21.385            |
| Ângulo de pressão  |                    |                          |                   |
| Ângulo de pressão de operação na seção normal (°)            | [alftwn]           | 20.723                   |                   |
| ângulo de hélice no círculo rolante (°)                      | [betaw]            | 15.072                   |                   |
| Ângulo oblíquo de base (°)                                   | [betab]            | 14.076                   |                   |
| Distância nominal entre centros (mm)                         | [ad]               | 421.875                  |                   |
| Soma de fatores de correção do perfil                        | [Summexi]          | 0.4324                   |                   |
| Fator de deslocamento de perfil                              | [x]                | 0.3122                   | 0.1202            |
| Espessura de dente (Arc) (módulo) (módulo)                   | [sn*]              | 1.7981                   | 1.6583            |
|  |                    |                          |                   |
| Alteração da altura da cabeça (mm)                           | [k*mn]             | -0.037                   | -0.037            |
| Diâmetro de círculo de referência (mm)                       | [d]                | 155.291                  | 688.459           |
| Diâmetro de base (mm)  | [db]               | 145.317                  | 644.240           |
| Diâmetro do círculo da cabeça (mm)                           | [da]               | 168.339                  | 699.587           |
| (mm)   | [da.e/i]           | 168.339 / 168.329        | 699.587 / 699.577 |
| Desvios limite do círculo da cabeça (mm)                     | [Ada.e/i]          | 0.000 / -0.010           | 0.000 / -0.010    |
| Diâmetro da cabeça (mm)                                      | [dFa]              | 168.339                  | 699.587           |
| (mm)   | [dFa.e/i]          | 168.339 / 168.329        | 699.587 / 699.577 |
| Diâmetro de círculo da cabeça (mm)                           | [dNa]              | 168.339                  | 699.587           |
| Diâmetro de círculo da cabeça (mm)                           | [dNa.e/i]          | 168.339 / 168.329        | 699.587 / 699.577 |
| Diâmetro primitivo de funcionamento (mm)                     | [dw]               | 156.074                  | 691.926           |
| (mm)   | [dw.e/i]           | 156.085 / 156.062        | 691.978 / 691.875 |
| Diâmetro do círculo do pé (mm)                               | [df]               | 145.913                  | 677.161           |
| Fator de correção do dentado de geração                      | [xE.e/i]           | 0.2861 / 0.2724          | 0.0721 / 0.0502   |
| Círculo do pé gerado com xE (mm)                             | [df.e/i]           | 145.652 / 145.515        | 676.680 / 676.460 |
| Folga da cabeça teórica (mm)                                 | [c]                | 1.250                    | 1.250             |
| Folga da cabeça efetiva (mm)                                 | [c.e/i]            | 1.637 / 1.459            | 1.486 / 1.349     |
| Diâmetro do círculo útil do pé (mm)                          | [dNf]              | 149.865                  | 682.197           |
| (mm)   | [dNf.e/i]          | 149.914 / 149.823        | 682.260 / 682.140 |
| Diâmetro do círculo do perfil do pé (mm)                     | [dFf]              | 149.532                  | 680.062           |
| (mm)   | [dFf.e/i]          | 149.359 / 149.270        | 679.626 / 679.428 |
| Reserve (dNf-dFf)/2 (mm)                                     | [cF.e/i]           | 0.322 / 0.232            | 1.416 / 1.257     |
| Altura da cabeça (mm)  | [ha=mn*(haP*+x+k)] | 6.524                    | 5.564             |
| (mm)   | [ha.e/i]           | 6.524 / 6.519            | 5.564 / 5.559     |
| Altura do pé (mm)  | [hf=mn*(hfP*-x)]   | 4.689                    | 5.649             |
| (mm)   | [hf.e/i]           | 4.820 / 4.888            | 5.889 / 5.999     |
| Ângulo de geração rel. dFa (°)                               | [xsi_dFa.e/i]      | 33.505 / 33.497          | 24.255 / 24.252   |
| Ângulo de geração rel. dNa (°)                               | [xsi_dNa.e/i]      | 33.505 / 33.497          | 24.255 / 24.252   |
| Ângulo de geração rel. dNf (°)                               | [xsi_dNf.e/i]      | 14.524 / 14.378          | 19.973 / 19.940   |
| Ângulo de geração rel. dFf (°)                               | [xsi_dFf.e/i]      | 13.607 / 13.454          | 19.249 / 19.194   |
| Altura do dente (mm)   | [h]                | 11.213                   | 11.213            |
| Número de dentes de substituição                             | [zn]               | 33.011                   | 146.348           |
| Espessura de dente normal no círculo de cabeça (mm)          | [san]              | 3.357                    | 4.083             |
| (mm)   | [san.e/i]          | 3.260 / 3.201            | 3.909 / 3.824     |
| Espessura de dente normal no círculo da forma da cabeça (mm) | [sFan]             | 3.357                    | 4.083             |
| (mm)   | [sFan.e/i]         | 3.260 / 3.201            | 3.909 / 3.824     |
| Largura do espaço normal no círculo do pé (mm)               | [efn]              | 4.044                    | 3.502             |
| (mm)   | [efn.e/i]          | 4.106 / 4.142            | 3.522 / 3.531     |
| Velocidade de deslizamento máx. na cabeça (m/s)              | [vga]              | 1.799                    | 1.303             |

|   |               |                              |                            |
|---|---------------|------------------------------|----------------------------|
| Deslizamento específico na cabeça                 | [zetaa]       | 0.404                        | 0.404                      |
| Deslizamento específico no pé                     | [zetaf]       | -0.679                       | -0.679                     |
| Deslizamento específico médio                     | [zetam]       | 0.404                        |                            |
| Fator de deslize na cabeça                        | [Kga]         | 0.220                        | 0.159                      |
| Fator de deslize no pé                            | [Kgf]         | -0.159                       | -0.220                     |
| Divisão de círculo de referência (mm)             | [pt]          | 16.262                       |                            |
| Divisão de círculo de base (mm)                   | [pbt]         | 15.218                       |                            |
| Divisão de pressão transversal (mm)               | [pet]         | 15.218                       |                            |
| Altura de inclinação (mm)                         | [pz]          | 1820.727                     | 8071.891                   |
| Divisão axial (mm)                                | [px]          | 60.691                       |                            |
| Comprimento da longitude de engrenagem (mm)       | [ga, e/i]     | 24.169 ( 24.255 / 24.060)    |                            |
| Comprimento T1-A, T2-A (mm)                       | [T1A, T2A]    | 18.320( 18.233/ 18.419)      | 136.360( 136.360/ 136.348) |
| Comprimento T1-B (mm)                             | [T1B, T2B]    | 27.271( 27.271/ 27.261)      | 127.409( 127.323/ 127.505) |
| Comprimento T1-C (mm)                             | [T1C, T2C]    | 28.469( 28.453/ 28.485)      | 126.211( 126.141/ 126.282) |
| Comprimento T1-D (mm)                             | [T1D, T2D]    | 33.537( 33.451/ 33.636)      | 121.143( 121.143/ 121.130) |
| Comprimento T1-E (mm)                             | [T1E, T2E]    | 42.488( 42.488/ 42.478)      | 112.192( 112.105/ 112.288) |
| Comprimento T1-T2 (mm)                            | [T1T2]        | 154.680 ( 154.594 / 154.766) |                            |
| Diâmetro do ponto de engrenagem individual B (mm) |               |                              |                            |
|   | [d-B]         | 155.216( 155.216/ 155.209)   | 692.804( 692.741/ 692.875) |
| Diâmetro do ponto de engrenagem individual D (mm) |               |                              |                            |
|   | [d-D]         | 160.050( 159.978/ 160.133)   | 688.293( 688.293/ 688.284) |
| Cobertura de cabeça                               | [eps]         | 0.921( 0.922/ 0.920)         | 0.667( 0.672/ 0.661)       |
| Comprimento mínimo da linha de contato (mm)       | [Lmin]        | 99.383                       |                            |
| Cobertura de perfil                               | [eps_a]       | 1.588                        |                            |
| Cobertura de perfil com desvios limite            | [eps_a.e/m/i] | 1.594 / 1.587 / 1.581        |                            |
| Coefficiente de cobertura                         | [eps_b]       | 1.000                        |                            |
| Cobertura total                                   | [eps_g]       | 2.588                        |                            |
| Cobertura total com desvios limite                | [eps_g.e/m/i] | 2.594 / 2.588 / 2.581        |                            |

## 2. FATORES DE INFLUÊNCIA GERAIS

|  |         | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 -- |
|--|---------|--------------------------|-----------------|
| Força tangencial nominal no círculo de referência (N)          | [Ft]    | 23059.8                  |                 |
| Força axial (N)  | [Fa]    | 6178.8                   |                 |
| Força radial (N)   | [Fr]    | 8689.1                   |                 |
| Força normal (N)   | [Fnorm] | 25405.4                  |                 |
| Força tangencial nominal por mm (N/mm)                         | [w]     | 379.90                   |                 |
| Apenas para fins informativos: Forças no círculo rolante:      |         |                          |                 |
| Força tangencial nominal (N)                                   | [Ftw]   | 22944.2                  |                 |
| Força axial (N)  | [Faw]   | 6178.8                   |                 |
| Força radial (N)   | [Frw]   | 8989.9                   |                 |
| Velocidade tangencial círculo de referência (m/s)              |         |                          |                 |
|  | [v]     | 8.13                     |                 |
| Velocidade tangencial círculo primitivo de funcionamento (m/s) | [v(dw)] |                          | 8.17            |
| Valor de entrada (μm)  | [yp]    | 0.8                      |                 |
| Valor de entrada (μm)  | [yf]    | 0.8                      |                 |
| Fator de correção  | [CM]    | 0.800                    |                 |
| Fator do corpo da engrenagem                                   | [CR]    | 1.000                    |                 |
| Fator de perfil de referência                                  | [CBS]   | 0.975                    |                 |
| Fator de material  | [E/Est] | 1.000                    |                 |
| Rigidez da mola individual (N/mm/μm)                           | [c']    | 14.852                   |                 |
| Rigidez da mola de engrenagem (N/mm/μm)                        | [cg]    | 21.404                   |                 |
| Massa reduzida (kg/mm)   | [mRed]  | 0.07583                  |                 |
| Velocidade de ressonância (min-1)                              | [nE1]   | 5348                     |                 |

|  |          |          |         |
|--|----------|----------|---------|
| Velocidade de referência (-)                                 | [N]      | 0.187    |         |
| Setor subcrítico   |          |          |         |
| Valor de entrada (μm)  | [ya]     | 0.8      |         |
| Distância entre mancais I do eixo do pinhão (mm)             | [l]      | 121.400  |         |
| Distância s do eixo do pinhão (mm)                           | [s]      | 12.140   |         |
| Diâmetro externo do eixo do pinhão (mm)                      | [dsh]    | 60.700   |         |
| Carga segundo Fig. 6.8, DIN 3990-1:1987 [-]                  | 4        |          |         |
| (0:6.8a, 1:6.8b, 2:6.8c, 3:6.8d, 4:6.8e)                     |          |          |         |
| Fator K' em conformidade com a Fig 6.8, DIN 3990-1:1987 [K'] | -1.00    |          |         |
| Sem efeito de apoio  |          |          |         |
| Desvio da linha de flancos, efetivo (μm)                     | [Fby]    | 4.25     |         |
| de deformação dos eixos (μm)                                 | [fsh*B1] | 0.00     |         |
| (fsh (μm) = 4.88, B1=0.00, fHb5 (μm) = 7.00)                 |          |          |         |
| Com correção total de linhas de flancos                      |          |          |         |
| Posição da marca de contato do dente: ótimo                  |          |          |         |
| de tolerâncias de fabricação (μm)                            | [fma*B2] | 5.00     |         |
| (B2= 0.50)   |          |          |         |
| Desvio da linha de flancos, teórico (μm)                     | [Fbx]    | 5.00     |         |
| Valor de entrada (μm)  | [yb]     | 0.75     |         |
| Fator dinâmico   | [KV]     | 1.031    |         |
| Fatores de largura - Flanco                                  | [KHb]    | 1.073    |         |
| - Pé do dente  | [KFb]    | 1.059    |         |
| - Raspagem (scuffing)  | [KBb]    | 1.073    |         |
| Fatores frontais - Flanco                                    | [KHα]    | 1.000    |         |
| - Pé do dente  | [KFα]    | 1.000    |         |
| - Raspagem (scuffing)  | [KBα]    | 1.000    |         |
| Fator de inclinação Raspagem (scuffing)                      | [Kbg]    | 1.238    |         |
| Número de ciclos de carga (em milhões)                       | [NL]     | 1200.000 | 270.677 |

### 3. CAPACIDADE DE CARGA DO PÉ DO DENTE

Cálculo de fatores de perfil do dente segundo o método: B

|  |         | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 -- |
|--|---------|--------------------------|-----------------|
| Cálculo com deslocamento de perfil de fabricação   | [xE.e]  | 0.2861                   | 0.0721          |
| Fator do perfil do dente   | [YF]    | 1.14                     | 1.26            |
| Fator de correção de tensão  | [YS]    | 2.25                     | 2.23            |
| Ângulo de aplicação de força (°)   | [alfFn] | 20.92                    | 20.25           |
| Braço da alavanca de flexão (mm)   | [hF]    | 4.60                     | 5.55            |
| Espessura do pé do dente (mm)  | [sFn]   | 10.98                    | 11.47           |
| Raio do pé do dente (mm)   | [roF]   | 2.31                     | 2.18            |
| (hF* = 0.919/ 1.109 sFn* = 2.195/ 2.295 roF* = 0.462/ 0.435)                                       |         |                          |                 |
| (den (mm) = 169.046/735.423 dsFn(mm) = 147.499/678.637 alfsFn(°) = 30.00/ 30.00 qs = 2.377/ 2.635) |         |                          |                 |
| Fator de relação de contato  | [Yeps]  | 1.000                    |                 |
| Fator helicoidal   | [Ybet]  | 0.875                    |                 |
| Largura de dente determinante (mm)   | [beff]  | 60.70                    | 60.70           |
| Tensão nominal do pé do dente (N/mm²)  | [sigF0] | 170.16                   | 187.02          |
| Tensão no pé do dente (N/mm²)  | [sigF]  | 297.19                   | 326.63          |

|   |                        |            |            |
|---|------------------------|------------|------------|
| Tensão de pé do dente admissível de engrenagem de verificação |                        |            |            |
| Sensibilidade ao entalhe                                      | [YdrelT]               | 0.999      | 1.001      |
| Fator de superfície   | [YRrelT]               | 0.957      | 0.957      |
| Fator dimensional (pé do dente)                               | [YX]                   | 1.000      | 1.000      |
| Fator de fadiga a baixo número de ciclos                      | [YNT]                  | 1.000      | 1.000      |
|   | [YdrelT*YRrelT*YX*YNT] | 0.956      | 0.958      |
| Coeficiente de flexão alternada (fator de tensão média)       | [YM]                   | 1.000      | 1.000      |
| Carga em flanco esquerdo/direito (%):                         |                        | 100.0, 0.0 | 100.0, 0.0 |
| Fator de correção de tensão                                   | [Yst]                  |            | 2.00       |
| Yst*sigFlim (N/mm <sup>2</sup> )                              | [sigFE]                | 860.00     | 740.00     |
| Tensão de pé do dente admissível (N/mm <sup>2</sup> )         | [sigFP=sigFG/SFmin]    | 587.02     | 506.34     |
| Resistência-limite de pé do dente (N/mm <sup>2</sup> )        | [sigFG]                | 821.83     | 708.88     |
| Segurança nominal   | [SFmin]                | 1.40       | 1.40       |
| Fator de segurança para tensão do pé do dente                 | [SF=sigFG/sigF]        | 2.77       | 2.17       |
| Potência transmissível (kW)                                   | [kWRating]             | 370.35     | 290.66     |

#### 4. SEGURANÇA DOS FLANCOS

|   |                     | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 -- |
|---|---------------------|--------------------------|-----------------|
| Fator de zona   | [ZH]                |                          | 2.378           |
| Fator de elasticidade ( $\sqrt{N/mm^2}$ )                     | [ZE]                |                          | 189.812         |
| Fator de relação de contato                                   | [Zeps]              |                          | 0.793           |
| Fator helicoidal  | [Zbet]              |                          | 0.983           |
| Largura de dente determinante (mm)                            | [beff]              |                          | 60.70           |
| Pressão de flancos nominal (N/mm <sup>2</sup> )               | [sigH0]             |                          | 609.47          |
| Compressão de flancos no círculo rolante (N/mm <sup>2</sup> ) | [sigHw]             |                          | 810.66          |
| Fator de engrenagem individual                                | [ZB,ZD]             | 1.00                     | 1.00            |
| Compressão de flancos (N/mm <sup>2</sup> )                    | [sigHB, sigHD]      | 810.66                   | 810.66          |
| Fator de lubrificante (com NL)                                | [ZL]                | 0.992                    | 0.992           |
| Fator de velocidade (com NL)                                  | [ZV]                | 0.994                    | 0.994           |
| Fator de rugosidade (com NL)                                  | [ZR]                | 1.001                    | 1.001           |
| Fator de combinação de material (com NL)                      | [ZW]                | 1.000                    | 1.000           |
| Fator de fadiga a baixo número de ciclos                      | [ZNT]               | 1.000                    | 1.000           |
|   | [ZL*ZV*ZR*ZNT]      | 0.987                    | 0.987           |
| Um pitting limitado permitido:                                | não                 |                          |                 |
| Fator dimensional (flanco)                                    | [ZX]                | 1.000                    | 1.000           |
| Pressão de flancos admissível (N/mm <sup>2</sup> )            | [sigHP=sigHG/SHmin] | 1481.15                  | 1204.67         |
| Resistência-limite a corrosão (N/mm <sup>2</sup> )            | [sigHG]             | 1481.15                  | 1204.67         |
| Segurança nominal   | [SHmin]             | 1.00                     | 1.00            |
| Segurança para pressão de flancos círculo rolante             |                     |                          |                 |
|   | [SHw]               | 1.83                     | 1.49            |
| Segurança para pressão engrenagem individual                  | [SHBD=sigHG/sigHBD] | 1.83                     | 1.49            |
| (Segurança relativamente ao torque transmissível)             |                     |                          |                 |
|   | [(SHBD)^2]          | 3.34                     | 2.21            |
| Potência transmissível (kW)                                   | [kWRating]          | 625.92                   | 414.06          |

#### 4b. MICROPITTING SEGUNDO ISO/TR 15144-1:2014

Cálculo da espessura específica admissível para a película

Lubrificante nível de força em conformidade com a norma FVA, publicação 54/7

10 (Entrada própria)

Dados de referência Teste FZG-C:

|  |             |       |
|--|-------------|-------|
| Torque (Nm)                                      | [T1Ref]     | 265.1 |
| Carga linear no ponto de contato A (N/mm)        | [FbbRef,A]  | 236.3 |
| Temperatura de óleo (°C)                         | [theOilRef] | 90.0  |
| Temperatura de massa (°C)                        | [theMRef]   | 115.7 |
| Temperatura de contato (°C)                      | [theBRef,A] | 188.7 |
| Espessura da folga de lubrificação (μm)          | [hRef,A]    | 0.071 |
| Espessura da película específica no teste (μm)   | [lamGFT]    | 0.141 |
| Fator de material                                | [WW]        | 0.82  |
| Espessura da película específica admissível (μm) | [lamGFP]    | 0.163 |

Resultado intermediário em conformidade com ISO/TR 15144:2014

|  |           |               |
|--|-----------|---------------|
| Coefficiente de atrito                         | [mym]     | 0.027         |
| Fator de lubrificante                          | [XL]      | 0.585 (Input) |
| Fator de rugosidade                            | [XR]      | 0.875         |
| Temperatura de massa (°C)                      | [theM]    | 61.3          |
| Fator de Recuo da cabeça                       | [XCa (A)] | 1.824         |
| Fator de dissipação                            | [HV]      | 0.093         |
| Módulo de elasticidade de substituição (N/mm²) | [Er]      | 226374        |
| Coefficiente pressão viscosidade (m²/N)        | [alf38]   | 0.02033       |
| Viscosidade dinâmica (Ns/m²)                   | [etatM]   | 49.9          |
| Valor de rugosidade médio (μm)                 | [Ra]      | 0.6           |

Cálculo das velocidades, distribuição de carga e curvatura de flancos segundo método B, em conformidade com ISO/TR 15144-1:2014

|  |           |                     |
|--|-----------|---------------------|
| Ca enquanto valor ótimo assumido no cálculo (0=não, 1=sim)                       | 1         | 1                   |
| Cálculo no ponto (0:A, 1:AB, 2:B, 3:C, 4:D, 5:DE, 6:E, -1:No Point)              | 1         | 1                   |
| Diâmetro (mm)  | [dy]      | 152.301 696.146     |
| Raio de curvatura de substituição (mm)   | [pred]    | 20.037              |
| Fator de aplicação da força  | [XY]      | 0.636               |
| (XY interpolated between XY(eps.b=0.8) and XY(eps.b=1.2) according ISO/TC60/WG6) |           |                     |
| Compressão de flancos (N/mm²)  | [pH]      | 681.613             |
| Compressão de flancos (N/mm²)  | [pdyn]    | 906.621             |
| Espessura da película específica mínima (μm)                                     | [lamGFY]  | 0.839 (hY=0.503 μm) |
| Segurança contra micropitting  | [Slam(B)] | 5.148               |
| (Resultados intermédios, ver arquivo: Micropitting_12.tmp)                       |           |                     |

## 5. RESISTÊNCIA À RASPAGEM (SCUFFING)

Método de cálculo em conformidade com DIN 3990:1987

Fator de lubrificação (para tipo de lubrificação)

|  |           |  |
|--|-----------|--|
|  | [XS]      | 1.000                                      |
| Teste de gripagem e nível de carga                         | [FZGtest] | FZG - Test A / 8.3 / 90 (ISO 14635 - 1) 14 |
| Coefficiente relativo de estrutura (gripagem)              | [XWrelT]  | 1.000                                      |
| Coefficiente de contato térm. (N/mm/s <sup>0.5</sup> /K)   | [BM]      | 13.780 13.780                              |
| Recuo da cabeça determinante (μm)                          | [Ca]      | 28.00 28.00                                |
| Recuo ótimo da cabeça (μm)                                 | [Ceff]    | 28.40                                      |
| Ca enquanto valor ótimo assumido no cálculo (0=não, 1=sim) | 1         | 1  |
| Largura de dente determinante (mm)                         | [beff]    | 60.700                                     |
| Força tangencial/largura de dente determinantes (N/mm)     | [wBt]     | 832.234                                    |
| Fator de ângulo  | [Xalfbet] | 0.991                                      |
| (ε1:0.921, ε2:0.667)                                       |           |  |

Critério de temperatura de flash

|                                       |              |       |
|---------------------------------------|--------------|-------|
| Temperatura de massa (°C)             | [theMB]      | 73.56 |
| (theMB = theoil + XS*0.47*thefflamax) |              |       |
| temperatura instantânea máxima (°C)   | [thefflamax] | 28.86 |



|   |             |                  |
|---|-------------|------------------|
| Temperatura de raspagem (scuffing) (°C)   | [theS]      | 546.29           |
| Coordenada Gamma (local da temp. máxima)<br>[Gamma.A]=-0.357 [Gamma.E]=0.492        | [Gamma]     | 0.243            |
| Temp. máxima contato. (°C)  | [theB]      | 102.43           |
| Fator de flash (°K*N <sup>-1</sup> .75*s <sup>1/2</sup> .5*m <sup>-1/2</sup> .5*mm) | [XM]        | 50.058           |
| Fator de geometria  | [XB]        | 0.112            |
| Fator de aplicação da força   | [XGam]      | 0.822            |
| Viscosidade dinâmica (mPa*s)  | [etaM]      | 32.50 ( 60.0 °C) |
| Coeficiente de atrito   | [mym]       | 0.065            |
| Segurança nominal   | [SBmin]     | 2.000            |
| Coeficiente de segurança para gripagem (scuffing) (temperatura instantânea)         | [SB]        | 11.460           |
| Critério de temperatura integral  |             |                  |
| Temperatura de massa (°C)   | [theMC]     | 68.07            |
| (theMC = theoil + XS*0.70*theflaint)  |             |                  |
| temperatura instantânea em media (°C)   | [theflaint] | 11.52            |
| Temperatura integral de raspagem (scuffing) (°C)                                    | [theSint]   | 546.29           |
| Fator de flash (°K*N <sup>-1</sup> .75*s <sup>1/2</sup> .5*m <sup>-1/2</sup> .5*mm) | [XM]        | 50.058           |
| Fator de relação de contato   | [Xeps]      | 0.242            |
| Viscosidade dinâmica (mPa*s)  | [etaOil]    | 52.51 ( 60.0 °C) |
| Coeficiente de atrito determinado   | [mym]       | 0.061            |
| Fator de geometria  | [XBE]       | 0.213            |
| Fator de engrenagem   | [XQ]        | 1.000            |
| Fator de Recuo da cabeça  | [XCa]       | 1.317            |
| Temperatura de flancos integral (°C)  | [theint]    | 85.35            |
| Segurança nominal   | [SSmin]     | 1.800            |
| Fator de segurança para raspagem (scuffing) (T. inter.)                             |             |                  |
|   | [SSint]     | 6.400            |
| Seg. p. torque de transmissão (Int.-T.)   | [SSL]       | 19.182           |

## 6. MEDIDA DE ENSAIO PARA A ESPESSURA DO DENTE

|   |            | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 --   |
|---|------------|--------------------------|-------------------|
|   |            | DIN 3967 cd25            | DIN 3967 cd25     |
| Tolerância de espessura de dente  |            |                          |                   |
| Desvio da espessura de dente na seção normal (mm)                             | [As.e/i]   | -0.095 / -0.145          | -0.175 / -0.255   |
| Número de dentes de medida  | [k]        | 5.000                    | 17.000            |
| Medida entre dentes sem folgas (mm)   | [Wk]       | 69.810                   | 254.244           |
| Medida entre dentes efetiva (mm)  | [Wk.e/i]   | 69.721 / 69.674          | 254.079 / 254.004 |
| (mm)  | [ΔWk.e/i]  | -0.089 / -0.136          | -0.164 / -0.240   |
| Diâmetro do circuito de medição (mm)  | [dMWk.m]   | 160.273                  | 689.757           |
| > Medida entre dentes engrenagem 2 não mensurável (engrenagem muito estreita) |            |                          |                   |
| Diâmetro de elemento de medição teor. (mm)                                    | [DM]       | 8.937                    | 8.421             |
| Diâmetro efet. de elemento de medição (mm)                                    | [DMeff]    | 9.000                    | 9.000             |
| Medida radial de uma esfera sem folgas (mm)                                   | [MrK]      | 85.599                   | 351.615           |
| Medida radial de uma esfera (mm)  | [MrK.e/i]  | 85.495 / 85.440          | 351.387 / 351.283 |
| Diâmetro do circuito de medição (mm)  | [dMMr.m]   | 158.277                  | 690.481           |
| Medida diametral de duas esferas, sem folga (mm)                              | [MdK]      | 171.198                  | 703.182           |
| Medida diametral de duas esferas (mm)   | [MdK.e/i]  | 170.990 / 170.881        | 702.726 / 702.517 |
| Medida diametral de um cilindro, sem folga (mm)                               | [MdR]      | 171.198                  | 703.231           |
| Medida sobre rolos em conformidade com DIN 3960 (mm)                          | [MdR.e/i]  | 170.990 / 170.881        | 702.775 / 702.566 |
| Measurement over 2 pins (free) according to AGMA 2002 (mm)                    |            |                          |                   |
|   | [dk2f.e/i] | 0.000 / 0.000            | 702.722 / 702.513 |
| Measurement over 2 pins (transverse) according to AGMA 2002 (mm)              |            |                          |                   |

|   |                  |           |          |               |         |
|---|------------------|-----------|----------|---------------|---------|
|   | [dk2t.e/i]       | 0.000 /   | 0.000    | 702.823 /     | 702.614 |
| Measurement over 3 pins (axial) according to AGMA 2002 (mm) |                  |           |          |               |         |
|   | [dk3A.e/i]       | 170.990 / | 170.881  | 702.775 /     | 702.566 |
| Espeçura cordal do dente sem folgas (mm)                    | [sc]             | 8.986     |          | 8.291         |         |
| Espeçura cordal do dente efetiva (mm)                       | [sc.e/i]         | 8.891 /   | 8.841    | 8.116 /       | 8.036   |
| Altura acima da corda a partir de da.m (mm)                 | [ha]             | 6.643     |          | 5.585         |         |
| Espeçura de dente (Arc) (mm)                                | [sn]             | 8.990     |          | 8.292         |         |
| (mm)  | [sn.e/i]         | 8.895 /   | 8.845    | 8.117 /       | 8.037   |
| Distância entre eixos sem folga (mm)                        | [aControl.e/i]   | 423.641   | /423.467 |               |         |
| Distância entre eixos sem folga, desvios limite (mm)        | [jta]            | -0.359 /  | -0.533   |               |         |
| dNf.i com aControl (mm)                                     | [dNf0.i]         | 149.174   |          | 681.237       |         |
| Reserva (dNf0.i-dFf.e)/2 (mm)                               | [cF0.i]          | -0.092    |          | 0.805         |         |
| Folga da cabeça (mm)  | [c0.i(aControl)] | 0.957     |          | 0.847         |         |
| Desvio limite da distância entre eixos (mm)                 | [Aa.e/i]         | 0.032 /   | -0.032   |               |         |
| Folga na circunferência primitiva de Aa (mm)                | [jtw_Aa.e/i]     | 0.025 /   | -0.025   |               |         |
| Folga radial (mm)   | [jrw]            | 0.565 /   | 0.328    |               |         |
| Folga na circunferência primitiva (seção transversal) (mm)  | [jtw]            | 0.441 /   | 0.256    |               |         |
| Folga de engrenamento normal (mm)                           | [jnw]            | 0.400 /   | 0.233    |               |         |
| Ângulo de torção na entrada com saída imobilizada:          |                  |           |          |               |         |
| Ângulo de torção total (°)                                  | [j.tSys]         |           |          | 0.3237/0.1881 |         |

## 7. TOLERÂNCIAS DO DENTADO

----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --

Em conformidade com

DIN 3961:1978

|  |             |       |       |
|--|-------------|-------|-------|
| Qualidade de engrenagem                                | [Q-DIN3961] | 6     | 6     |
| Erro de forma de perfil (µm)                           | [ff]        | 10.00 | 10.00 |
| Variação de ângulo de perfil (µm)                      | [fHa]       | 7.00  | 7.00  |
| Erro total de perfil (µm)                              | [Ff]        | 13.00 | 13.00 |
| Desvio de perfil da linha de flancos (µm)              | [fbf]       | 8.00  | 8.00  |
| Desvio de ângulo de linha de flancos (µm)              | [fHb]       | 10.00 | 10.00 |
| Desvio total da linha de flancos (µm)                  | [Fb]        | 13.00 | 13.00 |
| Desvio da separação de engrenagem (µm)                 | [fpe]       | 9.00  | 11.00 |
| Desvio individual do passo (µm)                        | [fp]        | 9.00  | 11.00 |
| Salto de divisão (µm)                                  | [fu]        | 11.00 | 13.00 |
| Desvio total do passo (µm)                             | [Fp]        | 34.00 | 45.00 |
| Desvio de passo por setor através de z/8 (µm)          | [Fpz/8]     | 22.00 | 28.00 |
| Desvio da concentricidade (µm)                         | [Fr]        | 25.00 | 32.00 |
| Variação de espessura de dente (µm)                    | [Rs]        | 15.00 | 18.00 |
| Divergência de engrenamento sobre um único flanco (µm) | [Fi']       | 38.00 | 46.00 |
| Salto de engrenamento sobre um flanco (µm)             | [fi']       | 15.00 | 16.00 |
| Erro composto radial (µm)                              | [Fi'']      | 28.00 | 35.00 |
| Salto de engrenamento sobre dois flancos (µm)          | [fi'']      | 12.00 | 16.00 |

Tolerâncias aplicáveis à posição do eixo (recomendação em conformidade com a norma ISO TR 10064-3:1996, qualidade

6)

|   |           |                   |
|---|-----------|-------------------|
| Valor máximo para desvio do eixo (µm)     | [fSigbet] | 17.00 (Fb= 17.00) |
| Valor máximo para inclinação do eixo (µm) | [fSigdel] | 34.00             |

## 8. DADOS COMPLEMENTARES

|  |   |         |         |
|--|---|---------|---------|
| Massas (kg)  | [m]                                     | 6.455   | 87.258  |
| Massa total (kg)   | [m]                                     | 93.714  |         |
| Momento de inércia (sistema relativo à entrada):<br>Cálculo sem ter em conta o perfil exato do dente |   |         |         |
| Engrenagens individualmente  | $((da+df)/2...di)$ (kg*m <sup>2</sup> ) |         |         |
|  | [TraeghMom]                             | 0.02589 | 7.78737 |
| System   | $((da+df)/2...di)$ (kg*m <sup>2</sup> ) |         |         |
|  | [TraeghMom]                             | 0.42210 |         |
| Rigidez circunferencial na entrada com saída imobilizada:  |   |         |         |
| Rigidez circunferencial (MNm/rad)  | [cr]                                    | 6.824   |         |
| Torção sob torque nominal (°)  | [delcr]                                 | 0.015   |         |
| Coefficiente de atrito médio (segundo Niemann)   | [mum]                                   | 0.028   |         |
| Deslizamento de desgaste segundo Niemann   | [zetw]                                  | 0.642   |         |
| Dissipação de potência do dente devido a carga (kW)  |   |         |         |
|  | [PVZ]                                   | 0.485   |         |
| (grau de eficiência dos dentes (%))  | [etaz]                                  | 99.741  |         |
| Nível de pressão acústica (em conformidade com Masuda)   |   |         |         |
|  | [dB(A)]                                 | 87.2    |         |

## 9. CORREÇÕES E CONFIRMAÇÃO DA FORMA DO PERFIL DO DENTE

### Correções de linhas de flancos e perfil para engrenagem

1

#### Simetricamente (ambos os flancos)

|                           |                |                  |                 |
|---------------------------|----------------|------------------|-----------------|
| - Recuo da cabeça, linear | Caa = 28.000µm | LCa = 0.895*mn   | dCa = 164.003mm |
| - Recuo do pé, linear     | Caf = 9.000µm  | LCf = 1.108*mn   | dCf = 152.301mm |
| - Abaulamento transversal | Cb = 10.000µm  | (rcrown=46056mm) |                 |

### Correções de linhas de flancos e perfil para engrenagem

2

#### Simetricamente (ambos os flancos)

|                           |                |                  |                 |
|---------------------------|----------------|------------------|-----------------|
| - Recuo da cabeça, linear | Caa = 28.000µm | LCa = 0.895*mn   | dCa = 696.146mm |
| - Recuo do pé, linear     | Caf = 9.000µm  | LCf = 1.689*mn   | dCf = 685.193mm |
| - Abaulamento transversal | Cb = 10.000µm  | (rcrown=46056mm) |                 |

#### Controle do recuo da cabeça

|                                       |          |             |             |
|---------------------------------------|----------|-------------|-------------|
| Diâmetro (mm)                         | [dcheck] | 168.229     | 699.477     |
| Recuo da cabeça esquerdo/direito (µm) | [Ca L/R] | 27.3 / 27.3 | 27.1 / 27.1 |

Dados para cálculo do perfil do dente:

Dados inexistentes.

## 10. VIDA ÚTIL, DANO

|                                   |         |      |
|-----------------------------------|---------|------|
| Segurança nominal pé do dente     | [SFmin] | 1.40 |
| Segurança nominal flanco do dente | [SHmin] | 1.00 |

Vida útil (calculada com seguranças nominais):

|                                   |        |           |
|-----------------------------------|--------|-----------|
| Tempo de vida útil do sistema (h) | [Hatt] | > 1000000 |
|-----------------------------------|--------|-----------|

|                                       |         |        |        |
|---------------------------------------|---------|--------|--------|
| Tempo de vida útil do pé do dente (h) | [HFatt] | 1e+006 | 1e+006 |
|---------------------------------------|---------|--------|--------|

Tempo de vida útil do flanco do dente (h)

|         |        |        |
|---------|--------|--------|
| [HHatt] | 1e+006 | 1e+006 |
|---------|--------|--------|

Indicação: A indicação 1e+006 h significa que a vida útil é > 1.000.000 h.

Dano calculado com base na vida útil nominal [H] ( 20000.0 h)

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| F1%  | F2%  | H1%  | H2%  |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Cálculo dos fatores para a confirmação da confiabilidade R(t) em conformidade com B.Bertsche, com distribuição Weibull:

$R(t) = 100 * \exp(-((t^{*fac} - t_0)/(T - t_0))^b) \%$ ; t (h)

| Engr<br>enag<br>em |                 | fac   | b   | t0         | T          | R(H)%  |
|--------------------|-----------------|-------|-----|------------|------------|--------|
| 1                  | Pé do dente     | 60000 | 1.7 | 9.654e+029 | 1.484e+030 | 100.00 |
| 1                  | Flanco do dente | 60000 | 1.3 | 9.014e+029 | 4.295e+030 | 100.00 |
| 2                  | Pé do dente     | 13534 | 1.7 | 9.654e+029 | 1.484e+030 | 100.00 |
| 2                  | Flanco do dente | 13534 | 1.3 | 9.014e+029 | 4.295e+030 | 100.00 |

Confiabilidade da configuração com vida útil nominal (%) 100.00 (Bertsche)

#### **OBSERVAÇÕES:**

- Indicações com [.e/i] significam: Valor máximo [e] e mínimo [i] perante Tomada em conta de todas as tolerâncias  
Indicações com [.m] significam: Valor médio na tolerância
- Em existindo folga de engrenamento, são tidas em conta as tolerâncias de distâncias entre eixos e os desvios limite para a espessura do dente  
. São indicadas as folgas máxima e mínima, em conformidade com os maiores e menores desvios limite.  
O cálculo é realizado para o círculo rolante.
- Detalhes sobre método de cálculo:  
cg segundo o método B  
KV segundo o método B  
KHb, KFb segundo o método C  
KH<sub>a</sub>, KF<sub>a</sub> em conformidade com o método B

Fim do Relatório

linhas: 598

## Engrenamento z1/z4 (Andar 1)

KISSsoft Release 03/2017 F

KISSsoft University license - Universidade do Porto

### Arquivo

Nome : Mauro Filipe Rodrigues Domingues

Modificado por: up201404793

Data: Junho de2019

Hora: -

## CÁLCULO DE UM PAR DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES OBLÍQUOS

Número no desenho ou artigo:

Engrenagem 1: z1

Engrenagem 2: z4

Método de cálculo DIN 3990:1987 Método B

### ----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --

|  |      |          |        |
|--|------|----------|--------|
| Potência (kW)                                      | [P]  | 187.500  |        |
| Velocidade (1/min)                                 | [n]  | 1000.0   | 225.6  |
| Torque (Nm)  | [T]  | 1790.5   | 7937.9 |
| Fator de aplicação                                 | [KA] |          | 1.60   |
| Vida útil exigida (h)                              | [H]  | 20000.00 |        |
| Engrenagem em acionamento (+)/acionada (-)         |      | +        | -      |
| Flanco de trabalho da engrenagem 1: Flanco direito |      |          |        |
| Sentido de rotação engrenagem 1 no sentido horário |      |          |        |

### 1. GEOMETRIA E MATERIAL DOS DENTES

(Cálculo da geometria em conformidade com ISO 21771:2007, DIN ISO 21771)

### ----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --

|   |                         |         |          |
|---|-------------------------|---------|----------|
| Distância entre eixos (mm)                    | [a]                     | 424.000 |          |
| Tolerância de distância entre eixos           | ISO 286:2010 Desvio js7 |         |          |
| Módulo normal (mm)                            | [mn]                    | 5.0000  |          |
| Ângulo de pressão na seção normal (°)         | [alfn]                  | 20.0000 |          |
| ângulo de hélice no círculo de referência (°) | [beta]                  | 15.0000 |          |
| Número de dentes                              | [z]                     | 30      | 133      |
| Largura de dente (mm)                         | [b]                     | 60.70   | 60.70    |
| Sentido de inclinação                         |                         | direita | esquerda |
| Qualidade de engrenagem                       | [Q-DIN 3961:1978]       | 6       | 6        |
| Diâmetro interno (mm)                         | [di]                    | 86.00   | 490.00   |
| Diâmetro interno do aro (mm)                  | [dbi]                   | 0.00    | 0.00     |

Material

|            |    |   |
|------------|----|---|
| Engrenagem | 1: | 18CrNiMo7-6, Aço de cementação, endurecido por cementação                 |
|            |    | ISO 6336-5 Figura 9/10 (MQ), Dureza do núcleo >=25HRC Jominy J=12mm<HRC28 |
| Engrenagem | 2: | 36 CrNiMo 4 (2), Aço beneficiado, temperado à chama/por ind.              |
|            |    | ISO 6336-5 Figura 11/12 (MQ) Flanco e pé endurecidos                      |

### ----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --

|  |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|
| Dureza superficial                           |         | HRC 61  | HRC 56  |
| Resist. fadiga Tensão no pé do dente (N/mm²) | [σFlim] | 430.00  | 370.00  |
| Resistência fad. Pressão hertziana (N/mm²)   | [σHlim] | 1500.00 | 1220.00 |
| Resistência à ruptura (N/mm²)                | [σB]    | 1200.00 | 1100.00 |
| Limite de elasticidade (N/mm²)               | [σS]    | 850.00  | 900.00  |
| Módulo de elasticidade (N/mm²)               | [E]     | 206000  | 206000  |

|  |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|
| Número de Poisson                                      | [v]   | 0.300 | 0.300 |
| Valor de rugosidade médio Ra, flanco (µm)              | [RAH] | 0.60  | 0.60  |
| Valor de rugosidade médio Ra, pé (µm)                  | [RAF] | 3.00  | 3.00  |
| Profundidade da rugosidade Rz determinada, flanco (µm) | [RZH] | 4.80  | 4.80  |
| Profundidade da rugosidade Rz determinada, pé (µm)     | [RZF] | 20.00 | 20.00 |

Perfil de referência da engrenagem

1 :

|  |  |                         |  |
|--|--|-------------------------|--|
| Perfil de referência                   | 1.25 / 0.38 / 1.0 ISO 53:1998 Perfil A |                         |  |
| Fator de altura do pé                  | [hfP*]                                 | 1.250                   |  |
| Fator do raio do pé                    | [rhofP*]                               | 0.380 (rhofPmax*=0.472) |  |
| Fator de altura da cabeça              | [haP*]                                 | 1.000                   |  |
| Fator de raio da cabeça                | [rhoaP*]                               | 0.000                   |  |
| Coeficiente de altura de protuberância | [hprP*]                                | 0.000                   |  |
| Ângulo da protuberância                | [alfprP]                               | 0.000                   |  |
| Fator de altura da forma da cabeça     | [hFaP*]                                | 0.000                   |  |
| Ângulo de flanco de chanfro            | [alfKP]                                | 0.000                   |  |

não sobreposto

Perfil de referência da engrenagem

2 :

|  |  |                         |  |
|--|--|-------------------------|--|
| Perfil de referência                   | 1.25 / 0.38 / 1.0 ISO 53:1998 Perfil A |                         |  |
| Fator de altura do pé                  | [hfP*]                                 | 1.250                   |  |
| Fator do raio do pé                    | [rhofP*]                               | 0.380 (rhofPmax*=0.472) |  |
| Fator de altura da cabeça              | [haP*]                                 | 1.000                   |  |
| Fator de raio da cabeça                | [rhoaP*]                               | 0.000                   |  |
| Coeficiente de altura de protuberância | [hprP*]                                | 0.000                   |  |
| Ângulo da protuberância                | [alfprP]                               | 0.000                   |  |
| Fator de altura da forma da cabeça     | [hFaP*]                                | 0.000                   |  |
| Ângulo de flanco de chanfro            | [alfKP]                                | 0.000                   |  |

não sobreposto

Resumo perfil de referência das engrenagens:

|  |          |       |       |
|--|----------|-------|-------|
| Perfil de referência da altura do pé   | [hfP*]   | 1.250 | 1.250 |
| Raio do pé, perfil de referência       | [rofP*]  | 0.380 | 0.380 |
| Altura da cabeça perfil de referência  | [haP*]   | 1.000 | 1.000 |
| Coeficiente de altura de protuberância | [hprP*]  | 0.000 | 0.000 |
| Ângulo da protuberância (°)            | [alfprP] | 0.000 | 0.000 |
| Fator de altura da forma da cabeça     | [hFaP*]  | 0.000 | 0.000 |
| Ângulo de flanco de chanfro (°)        | [alfKP]  | 0.000 | 0.000 |

Tipo de correção de perfil: para transmissão de alta capaci

|                      |      |      |      |
|----------------------|------|------|------|
| Recuo da cabeça (µm) | [Ca] | 28.0 | 28.0 |
|----------------------|------|------|------|

Tipo de lubrificação

Lubrificação por imersão em óleo

Tipos de óleo (Entrada própria)

Entrada própria

Base de lubrificante

Óleo sintético com base de poliglicol

Óleo de base a 40 graus viscos. nominal cinem. (mm²/s)

|        |        |
|--------|--------|
| [nu40] | 150.00 |
|--------|--------|

Óleo de base a 100 graus viscos. nominal cinem. (mm²/s)

|         |       |
|---------|-------|
| [nu100] | 18.00 |
|---------|-------|

Espessura esp. a 15 graus (kg/dm³)

|         |       |
|---------|-------|
| [roOil] | 0.870 |
|---------|-------|

Temperatura de óleo (°C)

|      |        |
|------|--------|
| [TS] | 60.000 |
|------|--------|

|  |                    | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 --   |
|--|--------------------|--------------------------|-------------------|
| Transmissão total  | [itot]             | -4.433                   |                   |
| Relação do número de dentes                                  | [u]                | 4.433                    |                   |
| Módulo transversal (mm)                                      | [mt]               | 5.176                    |                   |
| Ângulo de pressão no círculo de referência (°)               | [alft]             | 20.647                   |                   |
| Ângulo de pressão  | [alft]             | 21.396                   |                   |
| Ângulo de pressão de operação (°)                            | [alft.e/i]         | 21.407 /                 | 21.385            |
| Ângulo de pressão de operação na seção normal (°)            | [alftw]            | 20.723                   |                   |
| ângulo de hélice no círculo rolante (°)                      | [betaw]            | 15.072                   |                   |
| Ângulo oblíquo de base (°)                                   | [betab]            | 14.076                   |                   |
| Distância nominal entre centros (mm)                         | [ad]               | 421.875                  |                   |
| Soma de fatores de correção do perfil                        | [Summexi]          | 0.4324                   |                   |
| Fator de deslocamento de perfil                              | [x]                | 0.3122                   | 0.1202            |
| Espessura de dente (Arc) (módulo) (módulo)                   | [sn*]              | 1.7981                   | 1.6583            |
|  |                    |                          |                   |
| Alteração da altura da cabeça (mm)                           | [k*mn]             | -0.037                   | -0.037            |
| Diâmetro de círculo de referência (mm)                       | [d]                | 155.291                  | 688.459           |
| Diâmetro de base (mm)  | [db]               | 145.317                  | 644.240           |
| Diâmetro do círculo da cabeça (mm)                           | [da]               | 168.339                  | 699.587           |
| (mm)   | [da.e/i]           | 168.339 / 168.329        | 699.587 / 699.577 |
| Desvios limite do círculo da cabeça (mm)                     | [Ada.e/i]          | 0.000 / -0.010           | 0.000 / -0.010    |
| Diâmetro da cabeça (mm)                                      | [dFa]              | 168.339                  | 699.587           |
| (mm)   | [dFa.e/i]          | 168.339 / 168.329        | 699.587 / 699.577 |
| Diâmetro de círculo da cabeça (mm)                           | [dNa]              | 168.339                  | 699.587           |
| Diâmetro de círculo da cabeça (mm)                           | [dNa.e/i]          | 168.339 / 168.329        | 699.587 / 699.577 |
| Diâmetro primitivo de funcionamento (mm)                     | [dw]               | 156.074                  | 691.926           |
| (mm)   | [dw.e/i]           | 156.085 / 156.062        | 691.978 / 691.875 |
| Diâmetro do círculo do pé (mm)                               | [df]               | 145.913                  | 677.161           |
| Fator de correção do dentado de geração                      | [xE.e/i]           | 0.2861 / 0.2724          | 0.0721 / 0.0502   |
| Círculo do pé gerado com xE (mm)                             | [df.e/i]           | 145.652 / 145.515        | 676.680 / 676.460 |
| Folga da cabeça teórica (mm)                                 | [c]                | 1.250                    | 1.250             |
| Folga da cabeça efetiva (mm)                                 | [c.e/i]            | 1.637 / 1.459            | 1.486 / 1.349     |
| Diâmetro do círculo útil do pé (mm)                          | [dNf]              | 149.865                  | 682.197           |
| (mm)   | [dNf.e/i]          | 149.914 / 149.823        | 682.260 / 682.140 |
| Diâmetro do círculo do perfil do pé (mm)                     | [dFf]              | 149.532                  | 680.062           |
| (mm)   | [dFf.e/i]          | 149.359 / 149.270        | 679.626 / 679.428 |
| Reserve (dNf-dFf)/2 (mm)                                     | [cF.e/i]           | 0.322 / 0.232            | 1.416 / 1.257     |
| Altura da cabeça (mm)  | [ha=mn*(haP*+x+k)] | 6.524                    | 5.564             |
| (mm)   | [ha.e/i]           | 6.524 / 6.519            | 5.564 / 5.559     |
| Altura do pé (mm)  | [hf=mn*(hfP*-x)]   | 4.689                    | 5.649             |
| (mm)   | [hf.e/i]           | 4.820 / 4.888            | 5.889 / 5.999     |
| Ângulo de geração rel. dFa (°)                               | [xsi_dFa.e/i]      | 33.505 / 33.497          | 24.255 / 24.252   |
| Ângulo de geração rel. dNa (°)                               | [xsi_dNa.e/i]      | 33.505 / 33.497          | 24.255 / 24.252   |
| Ângulo de geração rel. dNf (°)                               | [xsi_dNf.e/i]      | 14.524 / 14.378          | 19.973 / 19.940   |
| Ângulo de geração rel. dFf (°)                               | [xsi_dFf.e/i]      | 13.607 / 13.454          | 19.249 / 19.194   |
| Altura do dente (mm)   | [h]                | 11.213                   | 11.213            |
| Número de dentes de substituição                             | [zn]               | 33.011                   | 146.348           |
| Espessura de dente normal no círculo de cabeça (mm)          | [san]              | 3.357                    | 4.083             |
| (mm)   | [san.e/i]          | 3.260 / 3.201            | 3.909 / 3.824     |
| Espessura de dente normal no círculo da forma da cabeça (mm) | [sFan]             | 3.357                    | 4.083             |
| (mm)   | [sFan.e/i]         | 3.260 / 3.201            | 3.909 / 3.824     |
| Largura do espaço normal no círculo do pé (mm)               | [efn]              | 4.044                    | 3.502             |
| (mm)   | [efn.e/i]          | 4.106 / 4.142            | 3.522 / 3.531     |
| Velocidade de deslizamento máx. na cabeça (m/s)              | [vga]              | 1.799                    | 1.303             |
| Deslizamento específico na cabeça                            | [zetaa]            | 0.404                    | 0.404             |

|   |               |                              |                            |
|---|---------------|------------------------------|----------------------------|
| Deslizamento específico no pé                     | [zetaf]       | -0.679                       | -0.679                     |
| Deslizamento específico médio                     | [zetam]       | 0.404                        |                            |
| Fator de deslize na cabeça                        | [Kga]         | 0.220                        | 0.159                      |
| Fator de deslize no pé                            | [Kgf]         | -0.159                       | -0.220                     |
| Divisão de círculo de referência (mm)             | [pt]          | 16.262                       |                            |
| Divisão de círculo de base (mm)                   | [pbt]         | 15.218                       |                            |
| Divisão de pressão transversal (mm)               | [pet]         | 15.218                       |                            |
| Altura de inclinação (mm)                         | [pz]          | 1820.727                     | 8071.891                   |
| Divisão axial (mm)                                | [px]          | 60.691                       |                            |
| Comprimento da longitude de engrenagem (mm)       | [ga, e/i]     | 24.169 ( 24.255 / 24.060)    |                            |
| Comprimento T1-A, T2-A (mm)                       | [T1A, T2A]    | 18.320( 18.233/ 18.419)      | 136.360( 136.360/ 136.348) |
| Comprimento T1-B (mm)                             | [T1B, T2B]    | 27.271( 27.271/ 27.261)      | 127.409( 127.323/ 127.505) |
| Comprimento T1-C (mm)                             | [T1C, T2C]    | 28.469( 28.453/ 28.485)      | 126.211( 126.141/ 126.282) |
| Comprimento T1-D (mm)                             | [T1D, T2D]    | 33.537( 33.451/ 33.636)      | 121.143( 121.143/ 121.130) |
| Comprimento T1-E (mm)                             | [T1E, T2E]    | 42.488( 42.488/ 42.478)      | 112.192( 112.105/ 112.288) |
| Comprimento T1-T2 (mm)                            | [T1T2]        | 154.680 ( 154.594 / 154.766) |                            |
| Diâmetro do ponto de engrenagem individual B (mm) | [d-B]         | 155.216( 155.216/ 155.209)   | 692.804( 692.741/ 692.875) |
| Diâmetro do ponto de engrenagem individual D (mm) | [d-D]         | 160.050( 159.978/ 160.133)   | 688.293( 688.293/ 688.284) |
| Cobertura de cabeça                               | [eps]         | 0.921( 0.922/ 0.920)         | 0.667( 0.672/ 0.661)       |
| Comprimento mínimo da linha de contato (mm)       | [Lmin]        | 99.383                       |                            |
| Cobertura de perfil                               | [eps_a]       | 1.588                        |                            |
| Cobertura de perfil com desvios limite            | [eps_a.e/m/i] | 1.594 / 1.587 / 1.581        |                            |
| Coefficiente de cobertura                         | [eps_b]       | 1.000                        |                            |
| Cobertura total                                   | [eps_g]       | 2.588                        |                            |
| Cobertura total com desvios limite                | [eps_g.e/m/i] | 2.594 / 2.588 / 2.581        |                            |

## 2. FATORES DE INFLUÊNCIA GERAIS

|  |         | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 -- |
|--|---------|--------------------------|-----------------|
| Força tangencial nominal no círculo de referência (N)          | [Ft]    | 23059.8                  |                 |
| Força axial (N)  | [Fa]    | 6178.8                   |                 |
| Força radial (N)   | [Fr]    | 8689.1                   |                 |
| Força normal (N)   | [Fnorm] | 25405.4                  |                 |
| Força tangencial nominal por mm (N/mm)                         | [w]     | 379.90                   |                 |
| Apenas para fins informativos: Forças no círculo rolante:      |         |                          |                 |
| Força tangencial nominal (N)                                   | [Ftw]   | 22944.2                  |                 |
| Força axial (N)  | [Faw]   | 6178.8                   |                 |
| Força radial (N)   | [Frw]   | 8989.9                   |                 |
| Velocidade tangencial círculo de referência (m/s)              | [v]     | 8.13                     |                 |
| Velocidade tangencial círculo primitivo de funcionamento (m/s) | [v(dw)] |                          | 8.17            |
| Valor de entrada (µm)  | [yp]    | 0.8                      |                 |
| Valor de entrada (µm)  | [yf]    | 0.8                      |                 |
| Fator de correção  | [CM]    | 0.800                    |                 |
| Fator do corpo da engrenagem                                   | [CR]    | 1.000                    |                 |
| Fator de perfil de referência                                  | [CBS]   | 0.975                    |                 |
| Fator de material  | [E/Est] | 1.000                    |                 |
| Rigidez da mola individual (N/mm/µm)                           | [c']    | 14.852                   |                 |
| Rigidez da mola de engrenagem (N/mm/µm)                        | [cg]    | 21.404                   |                 |
| Massa reduzida (kg/mm)   | [mRed]  | 0.07583                  |                 |
| Velocidade de ressonância (min-1)                              | [nE1]   | 5348                     |                 |
| Velocidade de referência (-)                                   | [N]     | 0.187                    |                 |



|  |          |          |         |
|--|----------|----------|---------|
| Setor subcrítico   |          |          |         |
| Valor de entrada (μm)  | [ya]     |          | 0.8     |
| Distância entre mancais I do eixo do pinhão (mm)             | [l]      |          | 121.400 |
| Distância s do eixo do pinhão (mm)                           | [s]      |          | 12.140  |
| Diâmetro externo do eixo do pinhão (mm)                      | [dsh]    |          | 60.700  |
| Carga segundo Fig. 6.8, DIN 3990-1:1987 [-]                  |          | 4        |         |
| (0:6.8a, 1:6.8b, 2:6.8c, 3:6.8d, 4:6.8e)                     |          |          |         |
| Fator K' em conformidade com a Fig 6.8, DIN 3990-1:1987 [K'] |          | -1.00    |         |
| Sem efeito de apoio  |          |          |         |
| Desvio da linha de flancos, efetivo (μm)                     | [Fby]    |          | 4.25    |
| de deformação dos eixos (μm)                                 | [fsh*B1] |          | 0.00    |
| (fsh (μm) = 4.88, B1=0.00, fHb5 (μm) = 7.00)                 |          |          |         |
| Com correção total de linhas de flancos                      |          |          |         |
| Posição da marca de contato do dente: ótimo                  |          |          |         |
| de tolerâncias de fabricação (μm)                            | [fma*B2] |          | 5.00    |
| (B2= 0.50)   |          |          |         |
| Desvio da linha de flancos, teórico (μm)                     | [Fbx]    |          | 5.00    |
| Valor de entrada (μm)  | [yb]     |          | 0.75    |
| Fator dinâmico   | [KV]     |          | 1.031   |
| Fatores de largura - Flanco                                  | [KHb]    |          | 1.073   |
| - Pé do dente  | [KFb]    |          | 1.059   |
| - Raspagem (scuffing)  | [KBb]    |          | 1.073   |
| Fatores frontais - Flanco                                    | [KHα]    |          | 1.000   |
| - Pé do dente  | [KFα]    |          | 1.000   |
| - Raspagem (scuffing)  | [KBα]    |          | 1.000   |
| Fator de inclinação Raspagem (scuffing)                      | [Kbg]    |          | 1.238   |
| Número de ciclos de carga (em milhões)                       | [NL]     | 1200.000 | 270.677 |

### 3. CAPACIDADE DE CARGA DO PÉ DO DENTE

Cálculo de fatores de perfil do dente segundo o método: B

|  |         | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 -- |
|--|---------|--------------------------|-----------------|
| Cálculo com deslocamento de perfil de fabricação   | [xE.e]  | 0.2861                   | 0.0721          |
| Fator do perfil do dente   | [YF]    | 1.14                     | 1.26            |
| Fator de correção de tensão  | [YS]    | 2.25                     | 2.23            |
| Ângulo de aplicação de força (°)   | [alfFn] | 20.92                    | 20.25           |
| Braço da alavanca de flexão (mm)   | [hF]    | 4.60                     | 5.55            |
| Espessura do pé do dente (mm)  | [sFn]   | 10.98                    | 11.47           |
| Raio do pé do dente (mm)   | [roF]   | 2.31                     | 2.18            |
| (hF* = 0.919/ 1.109 sFn* = 2.195/ 2.295 roF* = 0.462/ 0.435)                                       |         |                          |                 |
| (den (mm) = 169.046/735.423 dsFn(mm) = 147.499/678.637 alfsFn(°) = 30.00/ 30.00 qs = 2.377/ 2.635) |         |                          |                 |
| Fator de relação de contato  | [Yeps]  |                          | 1.000           |
| Fator helicoidal   | [Ybet]  |                          | 0.875           |
| Largura de dente determinante (mm)   | [beff]  | 60.70                    | 60.70           |
| Tensão nominal do pé do dente (N/mm²)  | [sigF0] | 170.16                   | 187.02          |
| Tensão no pé do dente (N/mm²)  | [sigF]  | 297.19                   | 326.63          |

|   |                        |            |            |
|---|------------------------|------------|------------|
| Tensão de pé do dente admissível de engrenagem de verificação |                        |            |            |
| Sensibilidade ao entalhe                                      | [YdrelT]               | 0.999      | 1.001      |
| Fator de superfície   | [YRrelT]               | 0.957      | 0.957      |
| Fator dimensional (pé do dente)                               | [YX]                   | 1.000      | 1.000      |
| Fator de fadiga a baixo número de ciclos                      | [YNT]                  | 1.000      | 1.000      |
|   | [YdrelT*YRrelT*YX*YNT] | 0.956      | 0.958      |
| Coeficiente de flexão alternada (fator de tensão média)       | [YM]                   | 1.000      | 1.000      |
| Carga em flanco esquerdo/direito (%):                         |                        | 100.0, 0.0 | 100.0, 0.0 |
| Fator de correção de tensão                                   | [Yst]                  |            | 2.00       |
| Yst*sigFlim (N/mm²)   | [sigFE]                | 860.00     | 740.00     |
| Tensão de pé do dente admissível (N/mm²)                      | [sigFP=sigFG/SFmin]    | 587.02     | 506.34     |
| Resistência-limite de pé do dente (N/mm²)                     | [sigFG]                | 821.83     | 708.88     |
| Segurança nominal   | [SFmin]                | 1.40       | 1.40       |
| Fator de segurança para tensão do pé do dente                 | [SF=sigFG/sigF]        | 2.77       | 2.17       |
| Potência transmissível (kW)                                   | [kWRating]             | 370.35     | 290.66     |

#### 4. SEGURANÇA DOS FLANCOS

|   |                     | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 -- |
|---|---------------------|--------------------------|-----------------|
| Fator de zona                                     | [ZH]                |                          | 2.378           |
| Fator de elasticidade ( $\sqrt{N/mm^2}$ )         | [ZE]                |                          | 189.812         |
| Fator de relação de contato                       | [Zeps]              |                          | 0.793           |
| Fator helicoidal                                  | [Zbet]              |                          | 0.983           |
| Largura de dente determinante (mm)                | [beff]              |                          | 60.70           |
| Pressão de flancos nominal (N/mm²)                | [sigH0]             |                          | 609.47          |
| Compressão de flancos no círculo rolante (N/mm²)  | [sigHw]             |                          | 810.66          |
| Fator de engrenagem individual                    | [ZB,ZD]             | 1.00                     | 1.00            |
| Compressão de flancos (N/mm²)                     | [sigHB, sigHD]      | 810.66                   | 810.66          |
| Fator de lubrificante (com NL)                    | [ZL]                | 0.992                    | 0.992           |
| Fator de velocidade (com NL)                      | [ZV]                | 0.994                    | 0.994           |
| Fator de rugosidade (com NL)                      | [ZR]                | 1.001                    | 1.001           |
| Fator de combinação de material (com NL)          | [ZW]                | 1.000                    | 1.000           |
| Fator de fadiga a baixo número de ciclos          | [ZNT]               | 1.000                    | 1.000           |
|   | [ZL*ZV*ZR*ZNT]      | 0.987                    | 0.987           |
| Um pitting limitado permitido:                    | não                 |                          |                 |
| Fator dimensional (flanco)                        | [ZX]                | 1.000                    | 1.000           |
| Pressão de flancos admissível (N/mm²)             | [sigHP=sigHG/SHmin] | 1481.15                  | 1204.67         |
| Resistência-limite a corrosão (N/mm²)             | [sigHG]             | 1481.15                  | 1204.67         |
| Segurança nominal                                 | [SHmin]             | 1.00                     | 1.00            |
| Segurança para pressão de flancos círculo rolante |                     |                          |                 |
|   | [SHw]               | 1.83                     | 1.49            |
| Segurança para pressão engrenagem individual      | [SHBD=sigHG/sigHBD] | 1.83                     | 1.49            |
| (Segurança relativamente ao torque transmissível) |                     |                          |                 |
|   | [(SHBD)^2]          | 3.34                     | 2.21            |
| Potência transmissível (kW)                       | [kWRating]          | 625.92                   | 414.06          |

#### 4b. MICROPITTING SEGUNDO ISO/TR 15144-1:2014

Cálculo da espessura específica admissível para a película

Lubrificante nível de força em conformidade com a norma FVA, publicação 54/7

10 (Entrada própria)

Dados de referência Teste FZG-C:

|  |             |       |
|--|-------------|-------|
| Torque (Nm)                                      | [T1Ref]     | 265.1 |
| Carga linear no ponto de contato A (N/mm)        | [FbbRef,A]  | 236.3 |
| Temperatura de óleo (°C)                         | [theOilRef] | 90.0  |
| Temperatura de massa (°C)                        | [theMRef]   | 115.7 |
| Temperatura de contato (°C)                      | [theBRef,A] | 188.7 |
| Espessura da folga de lubrificação (μm)          | [hRef,A]    | 0.071 |
| Espessura da película específica no teste (μm)   | [lamGFT]    | 0.141 |
| Fator de material                                | [WW]        | 0.82  |
| Espessura da película específica admissível (μm) | [lamGFP]    | 0.163 |

Resultado intermediário em conformidade com ISO/TR 15144:2014

|  |           |               |
|--|-----------|---------------|
| Coefficiente de atrito                         | [mym]     | 0.027         |
| Fator de lubrificante                          | [XL]      | 0.585 (Input) |
| Fator de rugosidade                            | [XR]      | 0.875         |
| Temperatura de massa (°C)                      | [theM]    | 61.3          |
| Fator de Recuo da cabeça                       | [XCa (A)] | 1.824         |
| Fator de dissipação                            | [HV]      | 0.093         |
| Módulo de elasticidade de substituição (N/mm²) | [Er]      | 226374        |
| Coefficiente pressão viscosidade (m²/N)        | [alf38]   | 0.02033       |
| Viscosidade dinâmica (Ns/m²)                   | [etatM]   | 49.9          |
| Valor de rugosidade médio (μm)                 | [Ra]      | 0.6           |

Cálculo das velocidades, distribuição de carga e curvatura de flancos segundo método B, em conformidade com ISO/TR 15144-1:2014

|  |           |                     |
|--|-----------|---------------------|
| Ca enquanto valor ótimo assumido no cálculo (0=não, 1=sim)                       | 1         | 1                   |
| Cálculo no ponto (0:A, 1:AB, 2:B, 3:C, 4:D, 5:DE, 6:E, -1:No Point)              | 1         | 1                   |
| Diâmetro (mm)  | [dy]      | 152.301 696.146     |
| Raio de curvatura de substituição (mm)   | [pred]    | 20.037              |
| Fator de aplicação da força  | [XY]      | 0.636               |
| (XY interpolated between XY(eps.b=0.8) and XY(eps.b=1.2) according ISO/TC60/WG6) |           |                     |
| Compressão de flancos (N/mm²)  | [pH]      | 681.613             |
| Compressão de flancos (N/mm²)  | [pdyn]    | 906.621             |
| Espessura da película específica mínima (μm)                                     | [lamGFY]  | 0.839 (hY=0.503 μm) |
| Segurança contra micropitting  | [Slam(B)] | 5.148               |
| (Resultados intermédios, ver arquivo: Micropitting_12.tmp)                       |           |                     |

## 5. RESISTÊNCIA À RASPAGEM (SCUFFING)

Método de cálculo em conformidade com DIN 3990:1987

Fator de lubrificação (para tipo de lubrificação)

|  |           |  |
|--|-----------|--|
|  | [XS]      | 1.000                                      |
| Teste de gripagem e nível de carga                         | [FZGtest] | FZG - Test A / 8.3 / 90 (ISO 14635 - 1) 14 |
| Coefficiente relativo de estrutura (gripagem)              | [XWrelT]  | 1.000                                      |
| Coefficiente de contato térm. (N/mm/s <sup>0.5</sup> /K)   | [BM]      | 13.780 13.780                              |
| Recuo da cabeça determinante (μm)                          | [Ca]      | 28.00 28.00                                |
| Recuo ótimo da cabeça (μm)                                 | [CeFF]    | 28.40                                      |
| Ca enquanto valor ótimo assumido no cálculo (0=não, 1=sim) | 1         | 1  |
| Largura de dente determinante (mm)                         | [beff]    | 60.700                                     |
| Força tangencial/largura de dente determinantes (N/mm)     | [wBt]     | 832.234                                    |
| Fator de ângulo  | [Xalfbet] | 0.991                                      |
| (ε1:0.921, ε2:0.667)                                       |           |  |

Critério de temperatura de flash

|   |            |        |
|---|------------|--------|
| Temperatura de massa (°C)               | [theMB]    | 73.56  |
| (theMB = theoil + XS*0.47*theflmax)     |            |        |
| temperatura instantânea máxima (°C)     | [theflmax] | 28.86  |
| Temperatura de raspagem (scuffing) (°C) | [theS]     | 546.29 |

|   |             |                  |
|---|-------------|------------------|
| Coordenada Gamma (local da temp. máxima)<br>[Gamma.A]=-0.357 [Gamma.E]=0.492    | [Gamma]     | 0.243            |
| Temp. máxima contato. (°C)  | [theB]      | 102.43           |
| Fator de flash (°K*N <sup>-1</sup> .75*s <sup>1.5</sup> *m <sup>-1.5</sup> *mm) | [XM]        | 50.058           |
| Fator de geometria  | [XB]        | 0.112            |
| Fator de aplicação da força   | [XGam]      | 0.822            |
| Viscosidade dinâmica (mPa*s)  | [etaM]      | 32.50 ( 60.0 °C) |
| Coefficiente de atrito  | [mym]       | 0.065            |
| Segurança nominal   | [SBmin]     | 2.000            |
| Coefficiente de segurança para gripagem (scuffing) (temperatura instantânea)    | [SB]        | 11.460           |
| Critério de temperatura integral  |             |                  |
| Temperatura de massa (°C)   | [theMC]     | 68.07            |
| (theMC = theoil + XS*0.70*theflaint)  |             |                  |
| temperatura instantânea em media (°C)   | [theflaint] | 11.52            |
| Temperatura integral de raspagem (scuffing) (°C)                                | [theSint]   | 546.29           |
| Fator de flash (°K*N <sup>-1</sup> .75*s <sup>1.5</sup> *m <sup>-1.5</sup> *mm) | [XM]        | 50.058           |
| Fator de relação de contato   | [Xeps]      | 0.242            |
| Viscosidade dinâmica (mPa*s)  | [etaOil]    | 52.51 ( 60.0 °C) |
| Coefficiente de atrito determinado  | [mym]       | 0.061            |
| Fator de geometria  | [XBE]       | 0.213            |
| Fator de engrenagem   | [XQ]        | 1.000            |
| Fator de Recuo da cabeça  | [XCa]       | 1.317            |
| Temperatura de flancos integral (°C)  | [theint]    | 85.35            |
| Segurança nominal   | [SSmin]     | 1.800            |
| Fator de segurança para raspagem (scuffing) (T. inter.)                         |             |                  |
|   | [SSint]     | 6.400            |
| Seg. p. torque de transmissão (Int.-T.)   | [SSL]       | 19.182           |

## 6. MEDIDA DE ENSAIO PARA A ESPESSURA DO DENTE

|   |            | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 --   |
|---|------------|--------------------------|-------------------|
| Tolerância de espessura de dente  |            | DIN 3967 cd25            | DIN 3967 cd25     |
| Desvio da espessura de dente na seção normal (mm)                             | [As.e/i]   | -0.095 / -0.145          | -0.175 / -0.255   |
| Número de dentes de medida  | [k]        | 5.000                    | 17.000            |
| Medida entre dentes sem folgas (mm)   | [Wk]       | 69.810                   | 254.244           |
| Medida entre dentes efetiva (mm)  | [Wk.e/i]   | 69.721 / 69.674          | 254.079 / 254.004 |
| (mm)  | [ΔWk.e/i]  | -0.089 / -0.136          | -0.164 / -0.240   |
| Diâmetro do circuito de medição (mm)  | [dMWk.m]   | 160.273                  | 689.757           |
| > Medida entre dentes engrenagem 2 não mensurável (engrenagem muito estreita) |            |                          |                   |
| Diâmetro de elemento de medição teor. (mm)                                    | [DM]       | 8.937                    | 8.421             |
| Diâmetro efet. de elemento de medição (mm)                                    | [DMeff]    | 9.000                    | 9.000             |
| Medida radial de uma esfera sem folgas (mm)                                   | [MrK]      | 85.599                   | 351.615           |
| Medida radial de uma esfera (mm)  | [MrK.e/i]  | 85.495 / 85.440          | 351.387 / 351.283 |
| Diâmetro do circuito de medição (mm)  | [dMMr.m]   | 158.277                  | 690.481           |
| Medida diametral de duas esferas, sem folga (mm)                              | [MdK]      | 171.198                  | 703.182           |
| Medida diametral de duas esferas (mm)   | [MdK.e/i]  | 170.990 / 170.881        | 702.726 / 702.517 |
| Medida diametral de um cilindro, sem folga (mm)                               | [MdR]      | 171.198                  | 703.231           |
| Medida sobre rolos em conformidade com DIN 3960 (mm)                          | [MdR.e/i]  | 170.990 / 170.881        | 702.775 / 702.566 |
| Measurement over 2 pins (free) according to AGMA 2002 (mm)                    |            |                          |                   |
|   | [dk2f.e/i] | 0.000 / 0.000            | 702.722 / 702.513 |
| Measurement over 2 pins (transverse) according to AGMA 2002 (mm)              |            |                          |                   |
|   | [dk2t.e/i] | 0.000 / 0.000            | 702.823 / 702.614 |

Measurement over 3 pins (axial) according to AGMA 2002 (mm)

|  |                  |                   |                   |
|--|------------------|-------------------|-------------------|
|  | [dk3A.e/i]       | 170.990 / 170.881 | 702.775 / 702.566 |
| Espessura cordal do dente sem folgas (mm)                  | [sc]             | 8.986             | 8.291             |
| Espessura cordal do dente efetiva (mm)                     | [sc.e/i]         | 8.891 / 8.841     | 8.116 / 8.036     |
| Altura acima da corda a partir de da.m (mm)                | [ha]             | 6.643             | 5.585             |
| Espessura de dente (Arc) (mm)                              | [sn]             | 8.990             | 8.292             |
| (mm)   | [sn.e/i]         | 8.895 / 8.845     | 8.117 / 8.037     |
| Distância entre eixos sem folga (mm)                       | [aControl.e/i]   | 423.641 / 423.467 |                   |
| Distância entre eixos sem folga, desvios limite (mm)       | [jta]            | -0.359 / -0.533   |                   |
| dNf.i com aControl (mm)                                    | [dNf0.i]         | 149.174           | 681.237           |
| Reserva (dNf0.i-dFf.e)/2 (mm)                              | [cF0.i]          | -0.092            | 0.805             |
| Folga da cabeça (mm)                                       | [c0.i(aControl)] | 0.957             | 0.847             |
| Desvio limite da distância entre eixos (mm)                | [Aa.e/i]         | 0.032 / -0.032    |                   |
| Folga na circunferência primitiva de Aa (mm)               | [jtw_Aa.e/i]     | 0.025 / -0.025    |                   |
| Folga radial (mm)  | [jrw]            | 0.565 / 0.328     |                   |
| Folga na circunferência primitiva (seção transversal) (mm) | [jtw]            | 0.441 / 0.256     |                   |
| Folga de engrenamento normal (mm)                          | [jnw]            | 0.400 / 0.233     |                   |
| Ângulo de torção na entrada com saída imobilizada:         |                  |                   |                   |
| Ângulo de torção total (°)                                 | [j.tSys]         | 0.3237 / 0.1881   |                   |

## 7. TOLERÂNCIAS DO DENTADO

----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --

Em conformidade com

DIN 3961:1978

|  |             |       |       |
|--|-------------|-------|-------|
| Qualidade de engrenagem                                | [Q-DIN3961] | 6     | 6     |
| Erro de forma de perfil (µm)                           | [ff]        | 10.00 | 10.00 |
| Variação de ângulo de perfil (µm)                      | [fHa]       | 7.00  | 7.00  |
| Erro total de perfil (µm)                              | [Ff]        | 13.00 | 13.00 |
| Desvio de perfil da linha de flancos (µm)              | [fbf]       | 8.00  | 8.00  |
| Desvio de ângulo de linha de flancos (µm)              | [fHb]       | 10.00 | 10.00 |
| Desvio total da linha de flancos (µm)                  | [Fb]        | 13.00 | 13.00 |
| Desvio da separação de engrenagem (µm)                 | [fpe]       | 9.00  | 11.00 |
| Desvio individual do passo (µm)                        | [fp]        | 9.00  | 11.00 |
| Salto de divisão (µm)                                  | [fu]        | 11.00 | 13.00 |
| Desvio total do passo (µm)                             | [Fp]        | 34.00 | 45.00 |
| Desvio de passo por setor através de z/8 (µm)          | [Fpz/8]     | 22.00 | 28.00 |
| Desvio da concentricidade (µm)                         | [Fr]        | 25.00 | 32.00 |
| Variação de espessura de dente (µm)                    | [Rs]        | 15.00 | 18.00 |
| Divergência de engrenamento sobre um único flanco (µm) | [Fi']       | 38.00 | 46.00 |
| Salto de engrenamento sobre um flanco (µm)             | [fi']       | 15.00 | 16.00 |
| Erro composto radial (µm)                              | [Fi'']      | 28.00 | 35.00 |
| Salto de engrenamento sobre dois flancos (µm)          | [fi'']      | 12.00 | 16.00 |

Tolerâncias aplicáveis à posição do eixo (recomendação em conformidade com a norma ISO TR 10064-3:1996, qualidade

6)

|   |           |                   |
|---|-----------|-------------------|
| Valor máximo para desvio do eixo (µm)     | [fSigbet] | 17.00 (Fb= 17.00) |
| Valor máximo para inclinação do eixo (µm) | [fSigdel] | 34.00             |

## 8. DADOS COMPLEMENTARES

|   |   |         |         |
|---|---|---------|---------|
| Massas (kg)   | [m]                                     | 6.455   | 87.258  |
| Massa total (kg)  | [m]                                     | 93.714  |         |
| Momento de inércia (sistema relativo à entrada):          |   |         |         |
| Cálculo sem ter em conta o perfil exato do dente          |   |         |         |
| Engrenagens individualmente                               | $((da+df)/2...di)$ (kg*m <sup>2</sup> ) |         |         |
|   | [TraeghMom]                             | 0.02589 | 7.78737 |
| System  | $((da+df)/2...di)$ (kg*m <sup>2</sup> ) |         |         |
|   | [TraeghMom]                             | 0.42210 |         |
| Rigidez circunferencial na entrada com saída imobilizada: |   |         |         |
| Rigidez circunferencial (MNm/rad)                         | [cr]                                    | 6.824   |         |
| Torção sob torque nominal (°)                             | [delcr]                                 | 0.015   |         |
| Coefficiente de atrito médio (segundo Niemann)            | [mum]                                   | 0.028   |         |
| Deslizamento de desgaste segundo Niemann                  | [zetw]                                  | 0.642   |         |
| Dissipação de potência do dente devido a carga (kW)       |   |         |         |
|   | [PVZ]                                   | 0.485   |         |
| (grau de eficiência dos dentes (%))                       | [etaz]                                  | 99.741  |         |
| Nível de pressão acústica (em conformidade com Masuda)    |   |         |         |
|   | [dB(A)]                                 | 87.2    |         |

## 9. CORREÇÕES E CONFIRMAÇÃO DA FORMA DO PERFIL DO DENTE

### Correções de linhas de flancos e perfil para engrenagem

1

#### Simetricamente (ambos os flancos)

|                           |                |                  |                 |
|---------------------------|----------------|------------------|-----------------|
| - Recuo da cabeça, linear | Caa = 28.000µm | LCa = 0.895*mn   | dCa = 164.003mm |
| - Recuo do pé, linear     | Caf = 9.000µm  | LCf = 1.108*mn   | dCf = 152.301mm |
| - Abaulamento transversal | Cb = 10.000µm  | (rcrown=46056mm) |                 |

### Correções de linhas de flancos e perfil para engrenagem

2

#### Simetricamente (ambos os flancos)

|                           |                |                  |                 |
|---------------------------|----------------|------------------|-----------------|
| - Recuo da cabeça, linear | Caa = 28.000µm | LCa = 0.895*mn   | dCa = 696.146mm |
| - Recuo do pé, linear     | Caf = 9.000µm  | LCf = 1.689*mn   | dCf = 685.193mm |
| - Abaulamento transversal | Cb = 10.000µm  | (rcrown=46056mm) |                 |

#### Controle do recuo da cabeça

|                                       |          |             |             |
|---------------------------------------|----------|-------------|-------------|
| Diâmetro (mm)                         | [dcheck] | 168.229     | 699.477     |
| Recuo da cabeça esquerdo/direito (µm) | [Ca L/R] | 27.3 / 27.3 | 27.1 / 27.1 |

Dados para cálculo do perfil do dente:

Dados inexistentes.

## 10. VIDA ÚTIL, DANO

|                                   |         |      |
|-----------------------------------|---------|------|
| Segurança nominal pé do dente     | [SFmin] | 1.40 |
| Segurança nominal flanco do dente | [SHmin] | 1.00 |

Vida útil (calculada com seguranças nominais):

|                                   |        |           |
|-----------------------------------|--------|-----------|
| Tempo de vida útil do sistema (h) | [Hatt] | > 1000000 |
|-----------------------------------|--------|-----------|

|                                       |         |        |        |
|---------------------------------------|---------|--------|--------|
| Tempo de vida útil do pé do dente (h) | [HFatt] | 1e+006 | 1e+006 |
|---------------------------------------|---------|--------|--------|

|   |         |        |        |
|---|---------|--------|--------|
| Tempo de vida útil do flanco do dente (h) | [HHatt] | 1e+006 | 1e+006 |
|---|---------|--------|--------|

Indicação: A indicação 1e+006 h significa que a vida útil é > 1.000.000 h.

Dano calculado com base na vida útil nominal [H] ( 20000.0 h)

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| F1%  | F2%  | H1%  | H2%  |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Cálculo dos fatores para a confirmação da confiabilidade R(t) em conformidade com B.Bertsche, com distribuição Weibull:

$R(t) = 100 * \exp(-((t * fac - t_0)/(T - t_0))^b) \%$ ; t (h)

| Engr<br>enag<br>em |                 | fac   | b   | t0         | T          | R(H)%  |
|--------------------|-----------------|-------|-----|------------|------------|--------|
| 1                  | Pé do dente     | 60000 | 1.7 | 9.654e+029 | 1.484e+030 | 100.00 |
| 1                  | Flanco do dente | 60000 | 1.3 | 9.014e+029 | 4.295e+030 | 100.00 |
| 2                  | Pé do dente     | 13534 | 1.7 | 9.654e+029 | 1.484e+030 | 100.00 |
| 2                  | Flanco do dente | 13534 | 1.3 | 9.014e+029 | 4.295e+030 | 100.00 |

Confiabilidade da configuração com vida útil nominal (%) 100.00 (Bertsche)

#### **OBSERVAÇÕES:**

- Indicações com [.e/i] significam: Valor máximo [e] e mínimo [i] perante Tomada em conta de todas as tolerâncias  
Indicações com [.m] significam: Valor médio na tolerância
- Em existindo folga de engrenamento, são tidas em conta as tolerâncias de distâncias entre eixos e os desvios limite para a espessura do dente  
. São indicadas as folgas máxima e mínima, em conformidade com os maiores e menores desvios limite.  
O cálculo é realizado para o círculo rolante.
- Detalhes sobre método de cálculo:  
cg segundo o método B  
KV segundo o método B  
KHb, KFb segundo o método C  
KHa, KFa em conformidade com o método B

Fim do Relatório

linhas: 598

## Engrenamento z3/z6 (Andar 2)

KISSsoft Release 03/2017 F

KISSsoft University license - Universidade do Porto

### Arquivo

Nome : Mauro Filipe Rodrigues Domingues

Modificado por: up201404793

Data: Junho de 2019

Hora: -

## CÁLCULO DE UM PAR DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES OBLÍQUOS

Número no desenho ou artigo:

Engrenagem 1: z3

Engrenagem 2: z6

Método de cálculo DIN 3990:1987 Método B

### ----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --

|   |      |          |         |
|---|------|----------|---------|
| Potência (kW)   | [P]  | 187.500  |         |
| Velocidade (1/min)                                      | [n]  | 225.6    | 60.3    |
| Torque (Nm)   | [T]  | 7937.9   | 29680.7 |
| Fator de aplicação                                      | [KA] |          | 1.60    |
| Vida útil exigida (h)                                   | [H]  | 20000.00 |         |
| Engrenagem em acionamento (+)/acionada (-)              |      | +        | -       |
| Flanco de trabalho da engrenagem 1: Flanco esquerdo     |      |          |         |
| Sentido de rotação engrenagem 1 no sentido anti-horário |      |          |         |

### 1. GEOMETRIA E MATERIAL DOS DENTES

(Cálculo da geometria em conformidade com ISO 21771:2007, DIN ISO 21771)

### ----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --

|   |                         |                  |        |
|---|-------------------------|------------------|--------|
| Distância entre eixos (mm)                    | [a]                     | 424.000          |        |
| Tolerância de distância entre eixos           | ISO 286:2010 Desvio js7 |                  |        |
| Módulo normal (mm)                            | [mn]                    | 7.0000           |        |
| Ângulo de pressão na seção normal (°)         | [alfn]                  | 20.0000          |        |
| ângulo de hélice no círculo de referência (°) | [beta]                  | 25.0000          |        |
| Número de dentes                              | [z]                     | 23               | 86     |
| Helicoidal Dupla                              | esquerda/direita        | direita/esquerda |        |
| Largura total (mm)                            | [b]                     | 119.10           | 119.10 |
| Largura da ranhura intermédia (mm)            | [bNut]                  | 15.00            |        |
| Largura de dente para cálculo (mm)            | [beH]                   | 52.05            | 52.05  |
| Qualidade de engrenagem                       | [Q-DIN 3961:1978]       | 6                | 6      |
| Diâmetro interno (mm)                         | [di]                    | 145.00           | 435.00 |
| Diâmetro interno do aro (mm)                  | [dbi]                   | 0.00             | 0.00   |

Material

|            |    |   |
|------------|----|---|
| Engrenagem | 1: | 18CrNiMo7-6, Aço de cementação, endurecido por cementação                 |
|            |    | ISO 6336-5 Figura 9/10 (MQ), Dureza do núcleo >=25HRC Jominy J=12mm<HRC28 |
| Engrenagem | 2: | 36 CrNiMo 4 (2), Aço beneficiado, temperado à chama/por ind.              |
|            |    | ISO 6336-5 Figura 11/12 (MQ) Flanco e pé endurecidos                      |

### ----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --

|  |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|
| Dureza superficial                           |         | HRC 61  | HRC 56  |
| Resist. fadiga Tensão no pé do dente (N/mm²) | [σFlim] | 430.00  | 370.00  |
| Resistência fad. Pressão hertziana (N/mm²)   | [σHlim] | 1500.00 | 1220.00 |



|  |       |         |         |
|--|-------|---------|---------|
| Resistência à ruptura (N/mm <sup>2</sup> )             | [σB]  | 1200.00 | 1100.00 |
| Limite de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )            | [σS]  | 850.00  | 900.00  |
| Módulo de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )            | [E]   | 206000  | 206000  |
| Número de Poisson                                      | [ν]   | 0.300   | 0.300   |
| Valor de rugosidade médio Ra, flanco (μm)              | [RAH] | 0.60    | 0.60    |
| Valor de rugosidade médio Ra, pé (μm)                  | [RAF] | 3.00    | 3.00    |
| Profundidade da rugosidade Rz determinada, flanco (μm) | [RZH] | 4.80    | 4.80    |
| Profundidade da rugosidade Rz determinada, pé (μm)     | [RZF] | 20.00   | 20.00   |

Perfil de referência da engrenagem

1 :

Perfil de referência 1.25 / 0.38 / 1.0 ISO 53:1998 Perfil A

|   |          |                         |
|---|----------|-------------------------|
| Fator de altura do pé                   | [hfP*]   | 1.250                   |
| Fator do raio do pé                     | [rhofP*] | 0.380 (rhofPmax*=0.472) |
| Fator de altura da cabeça               | [haP*]   | 1.000                   |
| Fator de raio da cabeça                 | [rhoaP*] | 0.000                   |
| Coefficiente de altura de protuberância | [hprP*]  | 0.000                   |
| Ângulo da protuberância                 | [alfprP] | 0.000                   |
| Fator de altura da forma da cabeça      | [hFaP*]  | 0.000                   |
| Ângulo de flanco de chanfro             | [alfKP]  | 0.000                   |

não sobreposto

Perfil de referência da engrenagem

2 :

Perfil de referência 1.25 / 0.38 / 1.0 ISO 53:1998 Perfil A

|   |          |                         |
|---|----------|-------------------------|
| Fator de altura do pé                   | [hfP*]   | 1.250                   |
| Fator do raio do pé                     | [rhofP*] | 0.380 (rhofPmax*=0.472) |
| Fator de altura da cabeça               | [haP*]   | 1.000                   |
| Fator de raio da cabeça                 | [rhoaP*] | 0.000                   |
| Coefficiente de altura de protuberância | [hprP*]  | 0.000                   |
| Ângulo da protuberância                 | [alfprP] | 0.000                   |
| Fator de altura da forma da cabeça      | [hFaP*]  | 0.000                   |
| Ângulo de flanco de chanfro             | [alfKP]  | 0.000                   |

não sobreposto

Resumo perfil de referência das engrenagens:

|   |          |       |       |
|---|----------|-------|-------|
| Perfil de referência da altura do pé    | [hfP*]   | 1.250 | 1.250 |
| Raio do pé, perfil de referência        | [rofP*]  | 0.380 | 0.380 |
| Altura da cabeça perfil de referência   | [haP*]   | 1.000 | 1.000 |
| Coefficiente de altura de protuberância | [hprP*]  | 0.000 | 0.000 |
| Ângulo da protuberância (°)             | [alfprP] | 0.000 | 0.000 |
| Fator de altura da forma da cabeça      | [hFaP*]  | 0.000 | 0.000 |
| Ângulo de flanco de chanfro (°)         | [alfKP]  | 0.000 | 0.000 |

Tipo de correção de perfil: para transmissão de alta capaci

|                     |      |      |      |
|---------------------|------|------|------|
| Reco da cabeça (μm) | [Ca] | 70.0 | 70.0 |
|---------------------|------|------|------|

|  |                                       |        |  |
|--|---------------------------------------|--------|--|
| Tipo de lubrificação   | Lubrificação por imersão em óleo      |        |  |
| Tipos de óleo (Entrada própria)                                      | Entrada própria                       |        |  |
| Base de lubrificante   | Óleo sintético com base de poliglicol |        |  |
| Óleo de base a 40 graus viscos. nominal cinem. (mm <sup>2</sup> /s)  |                                       |        |  |
|  | [nu40]                                | 150.00 |  |
| Óleo de base a 100 graus viscos. nominal cinem. (mm <sup>2</sup> /s) |                                       |        |  |
|  | [nu100]                               | 18.00  |  |

|  |                    |           |                           |
|--|--------------------|-----------|---------------------------|
| Espessura esp. a 15 graus (kg/dm³)                           | [roOil]            | 0.870     |                           |
| Temperatura de óleo (°C)                                     | [TS]               | 60.000    |                           |
| ----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --                     |                    |           |                           |
| Transmissão total  | [itot]             | -3.739    |                           |
| Relação do número de dentes                                  | [u]                | 3.739     |                           |
| Módulo transversal (mm)                                      | [mt]               | 7.724     |                           |
| Ângulo de pressão no círculo de referência (°)               | [alft]             | 21.880    |                           |
| Ângulo de pressão  | [alfwt]            | 22.888    |                           |
| Ângulo de pressão de operação (°)                            | [alfwt.e/i]        | 22.898 /  | 22.878                    |
| Ângulo de pressão de operação na seção normal (°)            | [alfwn]            | 20.913    |                           |
| ângulo de hélice no círculo rolante (°)                      | [betaw]            | 25.159    |                           |
| Ângulo oblíquo de base (°)                                   | [betab]            | 23.399    |                           |
| Distância nominal entre centros (mm)                         | [ad]               | 420.939   |                           |
| Soma de fatores de correção do perfil                        | [Summexi]          | 0.4470    |                           |
| Fator de deslocamento de perfil                              | [x]                | 0.3271    | 0.1199                    |
| Espessura de dente (Arc) (módulo) (módulo)                   | [sn*]              | 1.8089    | 1.6580                    |
| Alteração da altura da cabeça (mm)                           | [k*mn]             | -0.068    | -0.068                    |
| Diâmetro de círculo de referência (mm)                       | [d]                | 177.644   | 664.234                   |
| Diâmetro de base (mm)  | [db]               | 164.847   | 616.385                   |
| Diâmetro do círculo da cabeça (mm)                           | [da]               | 196.088   | 679.776                   |
| (mm)   | [da.e/i]           | 196.088 / | 196.078 679.776 / 679.766 |
| Desvios limite do círculo da cabeça (mm)                     | [Ada.e/i]          | 0.000 /   | -0.010 0.000 / -0.010     |
| Diâmetro da cabeça (mm)                                      | [dFa]              | 196.088   | 679.776                   |
| (mm)   | [dFa.e/i]          | 196.088 / | 196.078 679.776 / 679.766 |
| Diâmetro de círculo da cabeça (mm)                           | [dNa]              | 196.088   | 679.776                   |
| Diâmetro de círculo da cabeça (mm)                           | [dNa.e/i]          | 196.088 / | 196.078 679.776 / 679.766 |
| Diâmetro primitivo de funcionamento (mm)                     | [dw]               | 178.936   | 669.064                   |
| (mm)   | [dw.e/i]           | 178.949 / | 178.922 669.114 / 669.015 |
| Diâmetro do círculo do pé (mm)                               | [df]               | 164.724   | 648.412                   |
| Fator de correção do dentado de geração                      | [xE.e/i]           | 0.3085/   | 0.2987 0.0855/ 0.0698     |
| Círculo do pé gerado com xE (mm)                             | [df.e/i]           | 164.463 / | 164.325 647.931 / 647.711 |
| Folga da cabeça teórica (mm)                                 | [c]                | 1.750     | 1.750                     |
| Folga da cabeça efetiva (mm)                                 | [c.e/i]            | 2.137 /   | 1.959 1.986 / 1.849       |
| Diâmetro do círculo útil do pé (mm)                          | [dNf]              | 170.407   | 655.699                   |
| (mm)   | [dNf.e/i]          | 170.455 / | 170.366 655.761 / 655.644 |
| Diâmetro do círculo do perfil do pé (mm)                     | [dFf]              | 169.851   | 652.634                   |
| (mm)   | [dFf.e/i]          | 169.684 / | 169.597 652.211 / 652.018 |
| Reserve (dNf-dFf)/2 (mm)                                     | [cF.e/i]           | 0.429 /   | 0.341 1.871 / 1.717       |
| Altura da cabeça (mm)  | [ha=mn*(haP*+x+k)] | 9.222     | 7.771                     |
| (mm)   | [ha.e/i]           | 9.222 /   | 9.217 7.771 / 7.766       |
| Altura do pé (mm)  | [hf=mn*(hfP*-x)]   | 6.460     | 7.911                     |
| (mm)   | [hf.e/i]           | 6.591 /   | 6.659 8.151 / 8.261       |
| Ângulo de geração rel. dFa (°)                               | [xsi_dFa.e/i]      | 36.907 /  | 36.901 26.645 / 26.642    |
| Ângulo de geração rel. dNa (°)                               | [xsi_dNa.e/i]      | 36.907 /  | 36.901 26.645 / 26.642    |
| Ângulo de geração rel. dNf (°)                               | [xsi_dNf.e/i]      | 15.071 /  | 14.950 20.804 / 20.772    |
| Ângulo de geração rel. dFf (°)                               | [xsi_dFf.e/i]      | 13.981 /  | 13.853 19.817 / 19.762    |
| Altura do dente (mm)   | [h]                | 15.682    | 15.682                    |
| Número de dentes de substituição                             | [zn]               | 30.130    | 112.658                   |
| Espessura de dente normal no círculo de cabeça (mm)          | [san]              | 4.614     | 5.672                     |
| (mm)   | [san.e/i]          | 4.517 /   | 4.457 5.498 / 5.412       |
| Espessura de dente normal no círculo da forma da cabeça (mm) | [sFan]             | 4.614     | 5.672                     |
| (mm)   | [sFan.e/i]         | 4.517 /   | 4.457 5.498 / 5.412       |
| Largura do espaço normal no círculo do pé (mm)               | [efn]              | 0.000     | 4.987                     |

|   |               |           |           |           |          |                   |
|---|---------------|-----------|-----------|-----------|----------|-------------------|
|   | (mm)          | [efn.e/i] | 0.000 /   | 0.000     | 5.013 /  | 5.025             |
| Velocidade de deslizamento máx. na cabeça (m/s)   | [vga]         |           | 0.548     |           | 0.395    |                   |
| Deslizamento específico na cabeça                 | [zetaa]       |           | 0.437     |           | 0.437    |                   |
| Deslizamento específico no pé                     | [zetaf]       |           | -0.776    |           | -0.775   |                   |
| Deslizamento específico médio                     | [zetam]       |           |           | 0.437     |          |                   |
| Fator de deslize na cabeça                        | [Kga]         |           | 0.259     |           | 0.187    |                   |
| Fator de deslize no pé                            | [Kgf]         |           | -0.187    |           | -0.259   |                   |
| Divisão de círculo de referência (mm)             | [pt]          |           |           | 24.265    |          |                   |
| Divisão de círculo de base (mm)                   | [pbt]         |           |           | 22.517    |          |                   |
| Divisão de pressão transversal (mm)               | [pet]         |           |           | 22.517    |          |                   |
| Altura de inclinação (mm)                         | [pz]          |           | 1196.816  |           | 4475.052 |                   |
| Divisão axial (mm)                                | [px]          |           |           | 52.035    |          |                   |
| Comprimento da longitude de engrenagem (mm)       | [ga, e/i]     |           | 31.506 (  | 31.587 /  | 31.404)  |                   |
| Comprimento T1-A, T2-A (mm)                       | [T1A, T2A]    | 21.588(   | 21.507/   | 21.680)   | 143.321( | 143.321/ 143.309) |
| Comprimento T1-B (mm)                             | [T1B, T2B]    | 30.577(   | 30.577/   | 30.568)   | 134.332( | 134.251/ 134.422) |
| Comprimento T1-C (mm)                             | [T1C, T2C]    | 34.797(   | 34.780/   | 34.814)   | 130.111( | 130.048/ 130.175) |
| Comprimento T1-D (mm)                             | [T1D, T2D]    | 44.104(   | 44.023/   | 44.197)   | 120.805( | 120.805/ 120.793) |
| Comprimento T1-E (mm)                             | [T1E, T2E]    | 53.094(   | 53.094/   | 53.084)   | 111.815( | 111.734/ 111.905) |
| Comprimento T1-T2 (mm)                            | [T1T2]        |           | 164.909 ( | 164.828 / | 164.990) |                   |
| Diâmetro do ponto de engrenagem individual B (mm) |               |           |           |           |          |                   |
|   | [d-B]         | 175.825(  | 175.825/  | 175.818)  | 672.392( | 672.327/ 672.464) |
| Diâmetro do ponto de engrenagem individual D (mm) |               |           |           |           |          |                   |
|   | [d-D]         | 186.963(  | 186.887/  | 187.051)  | 662.047( | 662.047/ 662.038) |
| Cobertura de cabeça                               | [eps]         | 0.813(    | 0.813/    | 0.811)    | 0.587(   | 0.590/ 0.583)     |
| Comprimento mínimo da linha de contato (mm)       | [Lmin]        |           |           | 79.350    |          |                   |
| Cobertura de perfil                               | [eps_a]       |           |           | 1.399     |          |                   |
| Cobertura de perfil com desvios limite            | [eps_a.e/m/i] |           | 1.403 /   | 1.399 /   | 1.395    |                   |
| Coefficiente de cobertura                         | [eps_b]       |           |           | 1.000     |          |                   |
| Cobertura total                                   | [eps_g]       |           |           | 2.400     |          |                   |
| Cobertura total com desvios limite                | [eps_g.e/m/i] |           | 2.403 /   | 2.399 /   | 2.395    |                   |

## 2. FATORES DE INFLUÊNCIA GERAIS

|  |         |                          |                 |
|--|---------|--------------------------|-----------------|
|  |         | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 -- |
| Força tangencial nominal no círculo de referência (N)          | [Ft]    |                          | 89368.2         |
| Força axial (N)  | [Fa]    |                          | 0.0             |
| Força radial (N)   | [Fr]    |                          | 35890.0         |
| Força normal (N)   | [Fnorm] |                          | 104935.2        |
| Força tangencial nominal por mm (N/mm)                         | [w]     |                          | 858.48          |
| Apenas para fins informativos: Forças no círculo rolante:      |         |                          |                 |
| Força tangencial nominal (N)                                   | [Ftw]   |                          | 88722.9         |
| Força axial (N)  | [Faw]   |                          | 0.0             |
| Força radial (N)   | [Frw]   |                          | 37456.7         |
| Velocidade tangencial círculo de referência (m/s)              |         |                          |                 |
|  | [v]     |                          | 2.10            |
| Velocidade tangencial círculo primitivo de funcionamento (m/s) | [v(dw)] |                          | 2.11            |
| Valor de entrada (µm)  | [yp]    |                          | 0.9             |
| Valor de entrada (µm)  | [yf]    |                          | 1.1             |
| Fator de correção  | [CM]    |                          | 0.800           |
| Fator do corpo da engrenagem                                   | [CR]    |                          | 1.000           |
| Fator de perfil de referência                                  | [CBS]   |                          | 0.975           |
| Fator de material  | [E/Est] |                          | 1.000           |
| Rigidez da mola individual (N/mm/µm)                           | [c']    |                          | 13.742          |
| Rigidez da mola de engrenagem (N/mm/µm)                        | [cg]    |                          | 17.857          |

|  |          |         |        |
|--|----------|---------|--------|
| Massa reduzida (kg/mm)                                       | [mRed]   | 0.06624 |        |
| Velocidade de ressonância (min-1)                            | [nE1]    | 6817    |        |
| Velocidade de referência (-)                                 | [N]      | 0.033   |        |
| Setor subcrítico   |          |         |        |
| Valor de entrada (μm)  | [ya]     | 0.9     |        |
| Distância entre mancais I do eixo do pinhão (mm)             | [l]      | 190.600 |        |
| Distância s do eixo do pinhão (mm)                           | [s]      | 9.530   |        |
| Diâmetro externo do eixo do pinhão (mm)                      | [dsh]    | 95.300  |        |
| Carga segundo Fig. 6.8, DIN 3990-1:1987 [-]                  | 4        |         |        |
| (0:6.8a, 1:6.8b, 2:6.8c, 3:6.8d, 4:6.8e)                     |          |         |        |
| Fator K' em conformidade com a Fig 6.8, DIN 3990-1:1987 [K'] | -1.00    |         |        |
| Sem efeito de apoio  |          |         |        |
| Desvio da linha de flancos, efetivo (μm)                     | [Fby]    | 5.86    |        |
| de deformação dos eixos (μm)                                 | [fsh*B1] | 0.00    |        |
| (fsh (μm) = 4.38, B1= 0.00, fHb5 (μm) = 7.00)                |          |         |        |
| Com correção total de linhas de flancos                      |          |         |        |
| Posição da marca de contato do dente: ótimo                  |          |         |        |
| de tolerâncias de fabricação (μm)                            | [fma*B2] | 5.00    |        |
| (B2= 0.50)   |          |         |        |
| Desvio da linha de flancos, teórico (μm)                     | [Fbx]    | 6.89    |        |
| Valor de entrada (μm)  | [yb]     | 1.03    |        |
| Fator dinâmico   | [KV]     | 1.003   |        |
| Fatores de largura - Flanco                                  | [KHb]    | 1.038   |        |
| - Pé do dente  | [KFb]    | 1.027   |        |
| - Raspagem (scuffing)  | [KBb]    | 1.038   |        |
| Fatores frontais - Flanco                                    | [KHa]    | 1.000   |        |
| - Pé do dente  | [KFα]    | 1.000   |        |
| - Raspagem (scuffing)  | [KBα]    | 1.000   |        |
| Fator de inclinação Raspagem (scuffing)                      | [Kbg]    | 1.204   |        |
| Número de ciclos de carga (em milhões)                       | [NL]     | 270.677 | 72.390 |

### 3. CAPACIDADE DE CARGA DO PÉ DO DENTE

Cálculo de fatores de perfil do dente segundo o método: B

|  |          | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 -- |
|--|----------|--------------------------|-----------------|
| Cálculo com deslocamento de perfil   | [x]      | 0.3271                   | 0.1199          |
| Fator do perfil do dente   | [YF]     | 1.13                     | 1.23            |
| Fator de correção de tensão  | [YS]     | 2.27                     | 2.24            |
| Ângulo de aplicação de força (°)   | [alfFen] | 21.26                    | 20.35           |
| Braço da alavanca de flexão (mm)   | [hF]     | 6.39                     | 7.53            |
| Espessura do pé do dente (mm)  | [sFn]    | 15.37                    | 15.99           |
| Raio do pé do dente (mm)   | [roF]    | 3.18                     | 3.08            |
| (hF* = 0.912/ 1.075 sFn* = 2.196/ 2.284 roF* = 0.455/ 0.440)                                       |          |                          |                 |
| (den (mm) = 216.886/793.937 dsFn(mm) = 167.335/651.167 alfsFn(°) = 30.00/ 30.00 qs = 2.414/ 2.593) |          |                          |                 |
| Fator de relação de contato  | [Yeps]   | 1.000                    |                 |
| Fator helicoidal   | [Ybet]   | 0.792                    |                 |
| Largura de dente determinante (mm)   | [beff]   | 52.05                    | 52.05           |

|   |                        |            |            |
|---|------------------------|------------|------------|
| Tensão nominal do pé do dente (N/mm <sup>2</sup> )            | [sigF0]                | 248.33     | 267.91     |
| Tensão no pé do dente (N/mm <sup>2</sup> )                    | [sigF]                 | 409.45     | 441.73     |
| Tensão de pé do dente admissível de engrenagem de verificação |                        |            |            |
| Sensibilidade ao entalhe                                      | [YdrelT]               | 0.999      | 1.001      |
| Fator de superfície   | [YRrelT]               | 0.957      | 0.957      |
| Fator dimensional (pé do dente)                               | [YX]                   | 0.980      | 0.980      |
| Fator de fadiga a baixo número de ciclos                      | [YNT]                  | 1.000      | 1.000      |
|   | [YdrelT*YRrelT*YX*YNT] | 0.937      | 0.938      |
| Coeficiente de flexão alternada (fator de tensão média)       | [YM]                   | 1.000      | 1.000      |
| Carga em flanco esquerdo/direito (%):                         |                        | 100.0, 0.0 | 100.0, 0.0 |
| Fator de correção de tensão                                   | [Yst]                  |            | 2.00       |
| Yst*sigFlim (N/mm <sup>2</sup> )                              | [sigFE]                | 860.00     | 740.00     |
| Tensão de pé do dente admissível (N/mm <sup>2</sup> )         | [sigFP=sigFG/SFmin]    | 575.48     | 496.02     |
| Resistência-limite de pé do dente (N/mm <sup>2</sup> )        | [sigFG]                | 805.68     | 694.43     |
| Segurança nominal   | [SFmin]                | 1.40       | 1.40       |
| Fator de segurança para tensão do pé do dente                 | [SF=sigFG/sigF]        | 1.97       | 1.57       |
| Potência transmissível (kW)                                   | [kWRating]             | 263.53     | 210.54     |

#### 4. SEGURANÇA DOS FLANCOS

|   |                     | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 -- |
|---|---------------------|--------------------------|-----------------|
| Fator de zona   | [ZH]                | 2.247                    |                 |
| Fator de elasticidade ( $\sqrt{N/mm^2}$ )                     | [ZE]                | 189.812                  |                 |
| Fator de relação de contato                                   | [Zeps]              | 0.845                    |                 |
| Fator helicoidal  | [Zbet]              | 0.952                    |                 |
| Largura de dente determinante (mm)                            | [beff]              | 52.05                    |                 |
| Pressão de flancos nominal (N/mm <sup>2</sup> )               | [sigH0]             | 849.52                   |                 |
| Compressão de flancos no círculo rolante (N/mm <sup>2</sup> ) | [sigHw]             | 1096.66                  |                 |
| Fator de engrenagem individual                                | [ZB,ZD]             | 1.00                     | 1.00            |
| Compressão de flancos (N/mm <sup>2</sup> )                    | [sigHB, sigHD]      | 1096.66                  | 1096.66         |
| Fator de lubrificante (com NL)                                | [ZL]                | 0.992                    | 0.992           |
| Fator de velocidade (com NL)                                  | [ZV]                | 0.965                    | 0.965           |
| Fator de rugosidade (com NL)                                  | [ZR]                | 1.001                    | 1.001           |
| Fator de combinação de material (com NL)                      | [ZW]                | 1.000                    | 1.000           |
| Fator de fadiga a baixo número de ciclos                      | [ZNT]               | 1.000                    | 1.000           |
|   | [ZL*ZV*ZR*ZNT]      | 0.958                    | 0.958           |
| Um pitting limitado permitido:                                | não                 |                          |                 |
| Fator dimensional (flanco)                                    | [ZX]                | 1.000                    | 1.000           |
| Pressão de flancos admissível (N/mm <sup>2</sup> )            | [sigHP=sigHG/SHmin] | 1437.36                  | 1169.06         |
| Resistência-limite a corrosão (N/mm <sup>2</sup> )            | [sigHG]             | 1437.36                  | 1169.06         |
| Segurança nominal   | [SHmin]             | 1.00                     | 1.00            |
| Segurança para pressão de flancos círculo rolante             | [SHw]               | 1.31                     | 1.07            |
| Segurança para pressão engrenagem individual                  | [SHBD=sigHG/sigHBD] | 1.31                     | 1.07            |
| (Segurança relativamente ao torque transmissível)             |                     |                          |                 |
|   | [(SHBD)^2]          | 1.72                     | 1.14            |
| Potência transmissível (kW)                                   | [kWRating]          | 322.10                   | 213.07          |

#### 4b. MICROPITTING SEGUNDO ISO/TR 15144-1:2014

Cálculo da espessura específica admissível para a película

Lubrificante nível de força em conformidade com a norma FVA, publicação 54/7  
10 (Entrada própria)

Dados de referência Teste FZG-C:

|  |             |       |
|--|-------------|-------|
| Torque (Nm)                                      | [T1Ref]     | 265.1 |
| Carga linear no ponto de contato A (N/mm)        | [FbbRef,A]  | 236.3 |
| Temperatura de óleo (°C)                         | [theOilRef] | 90.0  |
| Temperatura de massa (°C)                        | [theMRef]   | 115.7 |
| Temperatura de contato (°C)                      | [theBRef,A] | 188.7 |
| Espessura da folga de lubrificação (μm)          | [hRef,A]    | 0.071 |
| Espessura da película específica no teste (μm)   | [lamGFT]    | 0.141 |
| Fator de material                                | [WW]        | 0.82  |
| Espessura da película específica admissível (μm) | [lamGFP]    | 0.163 |

Resultado intermediário em conformidade com ISO/TR 15144:2014

|  |           |               |
|--|-----------|---------------|
| Coefficiente de atrito                         | [mym]     | 0.037         |
| Fator de lubrificante                          | [XL]      | 0.585 (Input) |
| Fator de rugosidade                            | [XR]      | 0.828         |
| Temperatura de massa (°C)                      | [theM]    | 61.3          |
| Fator de Recuo da cabeça                       | [XCa (A)] | 1.664         |
| Fator de dissipação                            | [HV]      | 0.114         |
| Módulo de elasticidade de substituição (N/mm²) | [Er]      | 226374        |
| Coefficiente pressão viscosidade (m²/N)        | [alf38]   | 0.02033       |
| Viscosidade dinâmica (Ns/m²)                   | [etatM]   | 49.9          |
| Valor de rugosidade médio (μm)                 | [Ra]      | 0.6           |

Cálculo das velocidades, distribuição de carga e curvatura de flancos segundo método B, em conformidade com ISO/TR 15144-1:2014

|  |           |                     |
|--|-----------|---------------------|
| Ca enquanto valor ótimo assumido no cálculo (0=não, 1=sim)                       | 1         | 1                   |
| Cálculo no ponto (0:A, 1:AB, 2:B, 3:C, 4:D, 5:DE, 6:E, -1:No Point)              | 1         | 1                   |
| Diâmetro (mm)  | [dy]      | 172.904 676.034     |
| Raio de curvatura de substituição (mm)   | [pred]    | 23.925              |
| Fator de aplicação da força  | [XY]      | 0.667               |
| (XY interpolated between XY(eps.b=0.8) and XY(eps.b=1.2) according ISO/TC60/WG6) |           |                     |
| Compressão de flancos (N/mm²)  | [pH]      | 1363.296            |
| Compressão de flancos (N/mm²)  | [pdyn]    | 1759.910            |
| Espessura da película específica mínima (μm)                                     | [lamGFY]  | 0.266 (hY=0.160 μm) |
| Segurança contra micropitting  | [Slam(B)] | 1.633               |
| (Resultados intermédios, ver arquivo: Micropitting_12.tmp)                       |           |                     |

## 5. RESISTÊNCIA À RASPAGEM (SCUFFING)

Método de cálculo em conformidade com DIN 3990:1987

Fator de lubrificação (para tipo de lubrificação)

|  |           |  |
|--|-----------|--|
|  | [XS]      | 1.000                                      |
| Teste de gripagem e nível de carga                         | [FZGtest] | FZG - Test A / 8.3 / 90 (ISO 14635 - 1) 14 |
| Coefficiente relativo de estrutura (gripagem)              | [XWrelT]  | 1.000                                      |
| Coefficiente de contato térm. (N/mm/s <sup>0.5</sup> /K)   | [BM]      | 13.780 13.780                              |
| Recuo da cabeça determinante (μm)                          | [Ca]      | 70.00 70.00                                |
| Recuo ótimo da cabeça (μm)                                 | [CeFF]    | 67.23                                      |
| Ca enquanto valor ótimo assumido no cálculo (0=não, 1=sim) | 1         | 1  |
| Largura de dente determinante (mm)                         | [beff]    | 52.050                                     |
| Força tangencial/largura de dente determinantes (N/mm)     | [wBt]     | 1722.293                                   |
| Fator de ângulo  | [Xalfbet] | 1.001                                      |
| (ε1:0.813, ε2:0.587)                                       |           |  |

Critério de temperatura de flash

|                           |         |       |
|---------------------------|---------|-------|
| Temperatura de massa (°C) | [theMB] | 88.28 |
|---------------------------|---------|-------|

|  |             |                  |
|--|-------------|------------------|
| $(theMB = theoil + XS*0.47*theflamax)$                                       |             |                  |
| temperatura instantânea máxima (°C)  | [theflamax] | 60.17            |
| Temperatura de raspagem (scuffing) (°C)                                      | [theS]      | 546.29           |
| Coordenada Gamma (local da temp. máxima)                                     | [Gamma]     | 0.267            |
| [Gamma.A]=-0.380 [Gamma.E]=0.526   |             |                  |
| Temp. máxima contato. (°C)   | [theB]      | 148.45           |
| Fator de flash ( $^{\circ}K*N^{\wedge}-.75*s^{\wedge}.5*m^{\wedge}-.5*mm$ )  | [XM]        | 50.058           |
| Fator de geometria   | [XB]        | 0.124            |
| Fator de aplicação da força  | [XGam]      | 1.000            |
| Viscosidade dinâmica (mPa*s)   | [etaM]      | 20.74 ( 60.0 °C) |
| Coefficiente de atrito   | [mym]       | 0.113            |
| Segurança nominal  | [SBmin]     | 2.000            |
| Coefficiente de segurança para gripagem (scuffing) (temperatura instantânea) | [SB]        | 5.497            |
| Critério de temperatura integral   |             |                  |
| Temperatura de massa (°C)  | [theMC]     | 72.52            |
| $(theMC = theoil + XS*0.70*theflaint)$                                       |             |                  |
| temperatura instantânea em media (°C)  | [theflaint] | 17.89            |
| Temperatura integral de raspagem (scuffing) (°C)                             | [theSint]   | 546.29           |
| Fator de flash ( $^{\circ}K*N^{\wedge}-.75*s^{\wedge}.5*m^{\wedge}-.5*mm$ )  | [XM]        | 50.058           |
| Fator de relação de contato  | [Xeps]      | 0.277            |
| Viscosidade dinâmica (mPa*s)   | [etaOil]    | 52.51 ( 60.0 °C) |
| Coefficiente de atrito determinado   | [mym]       | 0.096            |
| Fator de geometria   | [XBE]       | 0.230            |
| Fator de engrenagem  | [XQ]        | 1.000            |
| Fator de Recuo da cabeça   | [XCa]       | 1.454            |
| Temperatura de flancos integral (°C)   | [theint]    | 99.36            |
| Segurança nominal  | [SSmin]     | 1.800            |
| Fator de segurança para raspagem (scuffing) (T. inter.)                      | [SSint]     | 5.498            |
| Seg. p. torque de transmissão (Int.-T.)                                      | [SSL]       | 12.355           |

## 6. MEDIDA DE ENSAIO PARA A ESPESSURA DO DENTE

|   |           | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 --   |
|---|-----------|--------------------------|-------------------|
| Tolerância de espessura de dente  |           | DIN 3967 cd25            | DIN 3967 cd25     |
| Desvio da espessura de dente na seção normal (mm)                             | [As.e/i]  | -0.095 / -0.145          | -0.175 / -0.255   |
| Número de dentes de medida  | [k]       | 4.000                    | 13.000            |
| Medida entre dentes sem folgas (mm)   | [Wk]      | 76.876                   | 270.038           |
| Medida entre dentes efetiva (mm)  | [Wk.e/i]  | 76.787 / 76.740          | 269.873 / 269.798 |
| (mm)  | [ΔWk.e/i] | -0.089 / -0.136          | -0.164 / -0.240   |
| Diâmetro do circuito de medição (mm)  | [dMWk.m]  | 179.270                  | 664.273           |
| > Medida entre dentes engrenagem 2 não mensurável (engrenagem muito estreita) |           |                          |                   |
| Diâmetro de elemento de medição teor. (mm)                                    | [DM]      | 12.598                   | 11.812            |
| Diâmetro efet. de elemento de medição (mm)                                    | [DMeff]   | 14.000                   | 12.000            |
| Medida radial de uma esfera sem folgas (mm)                                   | [MrK]     | 102.266                  | 341.302           |
| Medida radial de uma esfera (mm)  | [MrK.e/i] | 102.169 / 102.118        | 341.074 / 340.969 |
| Diâmetro do circuito de medição (mm)  | [dMMr.m]  | 184.206                  | 665.802           |
| Medida diametral de duas esferas, sem folga (mm)                              | [MdK]     | 204.089                  | 682.603           |
| Medida diametral de duas esferas (mm)   | [MdK.e/i] | 203.895 / 203.793        | 682.147 / 681.938 |
| Medida diametral de um cilindro, sem folga (mm)                               | [MdR]     | 204.533                  | 682.603           |
| Medida sobre rolos em conformidade com DIN 3960 (mm)                          | [MdR.e/i] | 204.339 / 204.236        | 682.147 / 681.938 |
| Measurement over 2 pins (free) according to AGMA 2002 (mm)                    |           |                          |                   |

|  |                  |                   |                   |
|--|------------------|-------------------|-------------------|
|  | [dk2f.e/i]       | 203.748 / 203.646 | 0.000 / 0.000     |
| Measurement over 2 pins (transverse) according to AGMA 2002 (mm) |                  |                   |                   |
|  | [dk2t.e/i]       | 204.769 / 204.667 | 0.000 / 0.000     |
| Measurement over 3 pins (axial) according to AGMA 2002 (mm)      |                  |                   |                   |
|  | [dk3A.e/i]       | 204.339 / 204.236 | 682.147 / 681.938 |
|  |                  |                   |                   |
| Espessura cordal do dente sem folgas (mm)                        | [sc]             | 12.655            | 11.606            |
| Espessura cordal do dente efetiva (mm)                           | [sc.e/i]         | 12.560 / 12.510   | 11.431 / 11.351   |
| Altura acima da corda a partir de da.m (mm)                      | [ha]             | 9.405             | 7.810             |
| Espessura de dente (Arc) (mm)                                    | [sn]             | 12.662            | 11.606            |
| (mm)   | [sn.e/i]         | 12.567 / 12.517   | 11.431 / 11.351   |
|  |                  |                   |                   |
| Distância entre eixos sem folga (mm)                             | [aControl.e/i]   | 423.644 / 423.472 |                   |
| Distância entre eixos sem folga, desvios limite (mm)             | [jta]            | -0.356 / -0.528   |                   |
| dNf.i com aControl (mm)  | [dNf0.i]         | 169.737           | 654.774           |
| Reserva (dNf0.i-dFf.e)/2 (mm)                                    | [cF0.i]          | 0.027             | 1.282             |
| Folga da cabeça (mm)   | [c0.i(aControl)] | 1.463             | 1.353             |
| Desvio limite da distância entre eixos (mm)                      | [Aa.e/i]         | 0.032 / -0.032    |                   |
|  |                  |                   |                   |
| Folga na circunferência primitiva de Aa (mm)                     | [jtw_Aa.e/i]     | 0.027 / -0.027    |                   |
| Folga radial (mm)  | [jrw]            | 0.560 / 0.325     |                   |
| Folga na circunferência primitiva (seção transversal) (mm)       | [jtw]            | 0.471 / 0.273     |                   |
| Folga de engrenamento normal (mm)                                | [jnw]            | 0.401 / 0.233     |                   |
| Ângulo de torção na entrada com saída imobilizada:               |                  |                   |                   |
| Ângulo de torção total (°)                                       | [j.tSys]         | 0.3017 / 0.1751   |                   |

## 7. TOLERÂNCIAS DO DENTADO

----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --

Em conformidade com

DIN 3961:1978

|  |             |       |       |
|--|-------------|-------|-------|
| Qualidade de engrenagem                                | [Q-DIN3961] | 6     | 6     |
| Erro de forma de perfil (µm)                           | [ff]        | 14.00 | 14.00 |
| Variação de ângulo de perfil (µm)                      | [fHa]       | 9.00  | 9.00  |
| Erro total de perfil (µm)                              | [Ff]        | 16.00 | 16.00 |
| Desvio de perfil da linha de flancos (µm)              | [fbf]       | 8.00  | 8.00  |
| Desvio de ângulo de linha de flancos (µm)              | [fHb]       | 10.00 | 10.00 |
| Desvio total da linha de flancos (µm)                  | [Fb]        | 13.00 | 13.00 |
| Desvio da separação de engrenagem (µm)                 | [fpe]       | 11.00 | 12.00 |
| Desvio individual do passo (µm)                        | [fp]        | 11.00 | 12.00 |
| Salto de divisão (µm)                                  | [fu]        | 13.00 | 15.00 |
| Desvio total do passo (µm)                             | [Fp]        | 37.00 | 49.00 |
| Desvio de passo por setor através de z/8 (µm)          | [Fpz/8]     | 24.00 | 31.00 |
| Desvio da concentricidade (µm)                         | [Fr]        | 28.00 | 35.00 |
| Variação de espessura de dente (µm)                    | [Rs]        | 16.00 | 21.00 |
| Divergência de engrenamento sobre um único flanco (µm) |             |       |       |
|  | [Fi']       | 43.00 | 52.00 |
| Salto de engrenamento sobre um flanco (µm)             | [fi']       | 19.00 | 20.00 |
| Erro composto radial (µm)                              | [Fi'']      | 31.00 | 38.00 |
| Salto de engrenamento sobre dois flancos (µm)          | [fi'']      | 14.00 | 17.00 |

Tolerâncias aplicáveis à posição do eixo (recomendação em conformidade com a norma ISO TR 10064-3:1996, qualidade

6)

|   |           |                  |
|---|-----------|------------------|
| Valor máximo para desvio do eixo (µm)     | [fSigbet] | 31.13 (Fb=17.00) |
| Valor máximo para inclinação do eixo (µm) | [fSigdel] | 62.25            |



## 8. DADOS COMPLEMENTARES

|   |   |             |          |
|---|---|-------------|----------|
| Massas (kg)   | [m]                                     | 8.438       | 184.421  |
| Massa total (kg)  | [m]                                     | 192.860     |          |
| Momento de inércia (sistema relativo à entrada):          |   |             |          |
| Cálculo sem ter em conta o perfil exato do dente          |   |             |          |
| Engrenagens individualmente                               | $((da+df)/2...di)$ (kg*m <sup>2</sup> ) |             |          |
|   | [TraeghMom]                             | 0.05651     | 14.52883 |
| System  | $((da+df)/2...di)$ (kg*m <sup>2</sup> ) | [TraeghMom] | 1.09568  |
| Rigidez circunferencial na entrada com saída imobilizada: |   |             |          |
| Rigidez circunferencial (MNm/rad)                         | [cr]                                    | 12.538      |          |
| Torção sob torque nominal (°)                             | [delcr]                                 | 0.036       |          |
| Coefficiente de atrito médio (segundo Niemann)            | [mum]                                   | 0.039       |          |
| Deslizamento de desgaste segundo Niemann                  | [zetw]                                  | 0.611       |          |
| Dissipação de potência do dente devido a carga (kW)       |   |             |          |
|   | [PVZ]                                   | 0.838       |          |
| (grau de eficiência dos dentes (%))                       | [etaz]                                  | 99.553      |          |
| Nível de pressão acústica (em conformidade com Masuda)    |   |             |          |
|   | [dB(A)]                                 | 84.9        |          |

## 9. CORREÇÕES E CONFIRMAÇÃO DA FORMA DO PERFIL DO DENTE

### Correções de linhas de flancos e perfil para engrenagem

1

#### Simetricamente (ambos os flancos)

|                           |                                 |                |                 |
|---------------------------|---------------------------------|----------------|-----------------|
| - Abaulamento transversal | Cb = 10.000µm (rcrown=177310mm) |                |                 |
| - Recuo da cabeça, linear | Caa = 70.000µm                  | LCa = 0.642*mn | dCa = 191.369mm |
| - Recuo do pé, linear     | Caf = 50.000µm                  | LCf = 0.654*mn | dCf = 172.904mm |

### Correções de linhas de flancos e perfil para engrenagem

2

#### Simetricamente (ambos os flancos)

|                           |                                 |                |                 |
|---------------------------|---------------------------------|----------------|-----------------|
| - Abaulamento transversal | Cb = 10.000µm (rcrown=177310mm) |                |                 |
| - Recuo da cabeça, linear | Caa = 70.000µm                  | LCa = 0.642*mn | dCa = 676.034mm |
| - Recuo do pé, linear     | Caf = 50.000µm                  | LCf = 1.388*mn | dCf = 658.819mm |

#### Controle do recuo da cabeça

|                                       |          |             |             |
|---------------------------------------|----------|-------------|-------------|
| Diâmetro (mm)                         | [dcheck] | 195.938     | 679.626     |
| Recuo da cabeça esquerdo/direito (µm) | [Ca L/R] | 67.9 / 67.9 | 67.3 / 67.3 |

Dados para cálculo do perfil do dente:

Dados inexistentes.

## 10. VIDA ÚTIL, DANO

|                                   |         |      |
|-----------------------------------|---------|------|
| Segurança nominal pé do dente     | [SFmin] | 1.40 |
| Segurança nominal flanco do dente | [SHmin] | 1.00 |

Vida útil (calculada com seguranças nominais):

|                                   |        |           |
|-----------------------------------|--------|-----------|
| Tempo de vida útil do sistema (h) | [Hatt] | > 1000000 |
|-----------------------------------|--------|-----------|

|   |         |        |        |
|---|---------|--------|--------|
| Tempo de vida útil do pé do dente (h)     | [HFatt] | 1e+006 | 1e+006 |
| Tempo de vida útil do flanco do dente (h) |         |        |        |

[HHatt] 1e+006 1e+006

Indicação: A indicação 1e+006 h significa que a vida útil é > 1.000.000 h.

Dano calculado com base na vida útil nominal [H] ( 20000.0 h)

| F1%  | F2%  | H1%  | H2%  |
|------|------|------|------|
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Cálculo dos fatores para a confirmação da confiabilidade R(t) em conformidade com B.Bertsche, com distribuição Weibull:

$R(t) = 100 * \exp(-((t*fac - t_0)/(T - t_0))^b) \%$ ; t (h)

| Engr<br>enag<br>em |                 | fac   | b   | t0         | T          | R(H)%  |
|--------------------|-----------------|-------|-----|------------|------------|--------|
| 1                  | Pé do dente     | 13534 | 1.7 | 9.654e+029 | 1.484e+030 | 100.00 |
| 1                  | Flanco do dente | 13534 | 1.3 | 9.014e+029 | 4.295e+030 | 100.00 |
| 2                  | Pé do dente     | 3620  | 1.7 | 9.654e+029 | 1.484e+030 | 100.00 |
| 2                  | Flanco do dente | 3620  | 1.3 | 9.014e+029 | 4.295e+030 | 100.00 |

Confiabilidade da configuração com vida útil nominal (%) 100.00 (Bertsche)

#### **OBSERVAÇÕES:**

- Indicações com [.e/i] significam: Valor máximo [e] e mínimo [i] perante Tomada em conta de todas as tolerâncias
- Indicações com [.m] significam: Valor médio na tolerância
- Em existindo folga de engrenamento, são tidas em conta as tolerâncias de distâncias entre eixos e os desvios limite para a espessura do dente
  - . São indicadas as folgas máxima e mínima, em conformidade com os maiores e menores desvios limite.
  - O cálculo é realizado para o círculo rolante.
- Detalhes sobre método de cálculo:
  - cg segundo o método B
  - KV segundo o método B
  - KHb, KFb segundo o método C
  - KHa, KFa em conformidade com o método B

Fim do Relatório

linhas: 600

## Engrenamento z5/z6 (Andar 2)

KISSsoft Release 03/2017 F

KISSsoft University license - Universidade do Porto

### Arquivo

Nome : Mauro Filipe Rodrigues Domingues

Modificado por: up201404793

Data: Junho de 2019

Hora: -

## CÁLCULO DE UM PAR DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES OBLÍQUOS

Número no desenho ou artigo:

Engrenagem 1: z5

Engrenagem 2: z6

Método de cálculo DIN 3990:1987 Método B

### ----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --

|   |      |          |         |
|---|------|----------|---------|
| Potência (kW)   | [P]  | 187.500  |         |
| Velocidade (1/min)                                      | [n]  | 225.6    | 60.3    |
| Torque (Nm)   | [T]  | 7937.9   | 29680.7 |
| Fator de aplicação                                      | [KA] |          | 1.60    |
| Vida útil exigida (h)                                   | [H]  | 20000.00 |         |
| Engrenagem em acionamento (+)/acionada (-)              |      | +        | -       |
| Flanco de trabalho da engrenagem 1: Flanco esquerdo     |      |          |         |
| Sentido de rotação engrenagem 1 no sentido anti-horário |      |          |         |

### 1. GEOMETRIA E MATERIAL DOS DENTES

(Cálculo da geometria em conformidade com ISO 21771:2007, DIN ISO 21771)

### ----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --

|   |                         |                  |        |
|---|-------------------------|------------------|--------|
| Distância entre eixos (mm)                    | [a]                     | 424.000          |        |
| Tolerância de distância entre eixos           | ISO 286:2010 Desvio js7 |                  |        |
| Módulo normal (mm)                            | [mn]                    | 7.0000           |        |
| Ângulo de pressão na seção normal (°)         | [alfn]                  | 20.0000          |        |
| ângulo de hélice no círculo de referência (°) | [beta]                  | 25.0000          |        |
| Número de dentes                              | [z]                     | 23               | 86     |
| Helicoidal Dupla                              | esquerda/direita        | direita/esquerda |        |
| Largura total (mm)                            | [b]                     | 119.10           | 119.10 |
| Largura da ranhura intermédia (mm)            | [bNut]                  | 15.00            |        |
| Largura de dente para cálculo (mm)            | [beH]                   | 52.05            | 52.05  |
| Qualidade de engrenagem                       | [Q-DIN 3961:1978]       | 6                | 6      |
| Diâmetro interno (mm)                         | [di]                    | 145.00           | 435.00 |
| Diâmetro interno do aro (mm)                  | [dbi]                   | 0.00             | 0.00   |

Material

|            |    |   |
|------------|----|---|
| Engrenagem | 1: | 18CrNiMo7-6, Aço de cementação, endurecido por cementação                 |
|            |    | ISO 6336-5 Figura 9/10 (MQ), Dureza do núcleo >=25HRC Jominy J=12mm<HRC28 |
| Engrenagem | 2: | 36 CrNiMo 4 (2), Aço beneficiado, temperado à chama/por ind.              |
|            |    | ISO 6336-5 Figura 11/12 (MQ) Flanco e pé endurecidos                      |

### ----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --

|  |         |        |        |
|--|---------|--------|--------|
| Dureza superficial                           |         | HRC 61 | HRC 56 |
| Resist. fadiga Tensão no pé do dente (N/mm²) | [σFlim] | 430.00 | 370.00 |

|   |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|
| Resistência fad. Pressão hertziana (N/mm <sup>2</sup> ) | [σHlim] | 1500.00 | 1220.00 |
| Resistência à ruptura (N/mm <sup>2</sup> )              | [σB]    | 1200.00 | 1100.00 |
| Limite de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )             | [σS]    | 850.00  | 900.00  |
| Módulo de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )             | [E]     | 206000  | 206000  |
| Número de Poisson                                       | [ν]     | 0.300   | 0.300   |
| Valor de rugosidade médio Ra, flanco (μm)               | [RAH]   | 0.60    | 0.60    |
| Valor de rugosidade médio Ra, pé (μm)                   | [RAF]   | 3.00    | 3.00    |
| Profundidade da rugosidade Rz determinada, flanco (μm)  | [RZH]   | 4.80    | 4.80    |
| Profundidade da rugosidade Rz determinada, pé (μm)      | [RZF]   | 20.00   | 20.00   |

Perfil de referência da engrenagem

1 :

|   |  |                         |  |
|---|--|-------------------------|--|
| Perfil de referência                    | 1.25 / 0.38 / 1.0 ISO 53:1998 Perfil A |                         |  |
| Fator de altura do pé                   | [hfP*]                                 | 1.250                   |  |
| Fator do raio do pé                     | [rhofP*]                               | 0.380 (rhofPmax*=0.472) |  |
| Fator de altura da cabeça               | [haP*]                                 | 1.000                   |  |
| Fator de raio da cabeça                 | [rhoaP*]                               | 0.000                   |  |
| Coefficiente de altura de protuberância | [hprP*]                                | 0.000                   |  |
| Ângulo da protuberância                 | [alfprP]                               | 0.000                   |  |
| Fator de altura da forma da cabeça      | [hFaP*]                                | 0.000                   |  |
| Ângulo de flanco de chanfro             | [alfKP]                                | 0.000                   |  |

não sobreposto

Perfil de referência da engrenagem

2 :

|   |  |                         |  |
|---|--|-------------------------|--|
| Perfil de referência                    | 1.25 / 0.38 / 1.0 ISO 53:1998 Perfil A |                         |  |
| Fator de altura do pé                   | [hfP*]                                 | 1.250                   |  |
| Fator do raio do pé                     | [rhofP*]                               | 0.380 (rhofPmax*=0.472) |  |
| Fator de altura da cabeça               | [haP*]                                 | 1.000                   |  |
| Fator de raio da cabeça                 | [rhoaP*]                               | 0.000                   |  |
| Coefficiente de altura de protuberância | [hprP*]                                | 0.000                   |  |
| Ângulo da protuberância                 | [alfprP]                               | 0.000                   |  |
| Fator de altura da forma da cabeça      | [hFaP*]                                | 0.000                   |  |
| Ângulo de flanco de chanfro             | [alfKP]                                | 0.000                   |  |

não sobreposto

Resumo perfil de referência das engrenagens:

|   |          |       |       |
|---|----------|-------|-------|
| Perfil de referência da altura do pé    | [hfP*]   | 1.250 | 1.250 |
| Raio do pé, perfil de referência        | [rofpP*] | 0.380 | 0.380 |
| Altura da cabeça perfil de referência   | [haP*]   | 1.000 | 1.000 |
| Coefficiente de altura de protuberância | [hprP*]  | 0.000 | 0.000 |
| Ângulo da protuberância (°)             | [alfprP] | 0.000 | 0.000 |
| Fator de altura da forma da cabeça      | [hFaP*]  | 0.000 | 0.000 |
| Ângulo de flanco de chanfro (°)         | [alfKP]  | 0.000 | 0.000 |

Tipo de correção de perfil: para transmissão de alta capaci

|                     |      |      |      |
|---------------------|------|------|------|
| Reco da cabeça (μm) | [Ca] | 70.0 | 70.0 |
|---------------------|------|------|------|

|  |                                       |        |  |
|--|---------------------------------------|--------|--|
| Tipo de lubrificação   | Lubrificação por imersão em óleo      |        |  |
| Tipos de óleo (Entrada própria)                                      | Óleo: Klübersynth EG 4-150            |        |  |
| Base de lubrificante   | Óleo sintético com base de poliglicol |        |  |
| Óleo de base a 40 graus viscos. nominal cinem. (mm <sup>2</sup> /s)  | [nu40]                                | 150.00 |  |
| Óleo de base a 100 graus viscos. nominal cinem. (mm <sup>2</sup> /s) |                                       |        |  |

|  |                    |           |         |                   |
|--|--------------------|-----------|---------|-------------------|
|  | [nu100]            | 18.00     |         |                   |
| Espessura esp. a 15 graus (kg/dm³)                                 | [roOil]            | 0.870     |         |                   |
| Temperatura de óleo (°C)   | [TS]               | 60.000    |         |                   |
| ----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --                           |                    |           |         |                   |
| Transmissão total  | [itot]             | -3.739    |         |                   |
| Relação do número de dentes  | [u]                | 3.739     |         |                   |
| Módulo transversal (mm)  | [mt]               | 7.724     |         |                   |
| Ângulo de pressão no círculo de referência (°)                     | [alft]             | 21.880    |         |                   |
| Ângulo de pressãoÂngulo de pressão de operação (°)                 | [alfwt]            | 22.888    |         |                   |
|  | [alfwt.e/i]        | 22.898 /  | 22.878  |                   |
| Ângulo de pressãoÂngulo de pressão de operação na seção normal (°) | [alfwn]            | 20.913    |         |                   |
| ângulo de hélice no círculo rolante (°)                            | [betaw]            | 25.159    |         |                   |
| Ângulo oblíquo de base (°)   | [betab]            | 23.399    |         |                   |
| Distância nominal entre centros (mm)                               | [ad]               | 420.939   |         |                   |
| Soma de fatores de correção do perfil                              | [Summexi]          | 0.4470    |         |                   |
| Fator de deslocamento de perfil                                    | [x]                | 0.3271    | 0.1199  |                   |
| Espessura de dente (Arc) (módulo) (módulo)                         | [sn*]              | 1.8089    | 1.6580  |                   |
| Alteração da altura da cabeça (mm)                                 | [k*mn]             | -0.068    | -0.068  |                   |
| Diâmetro de círculo de referência (mm)                             | [d]                | 177.644   | 664.234 |                   |
| Diâmetro de base (mm)  | [db]               | 164.847   | 616.385 |                   |
| Diâmetro do círculo da cabeça (mm)                                 | [da]               | 196.088   | 679.776 |                   |
| (mm)   | [da.e/i]           | 196.088 / | 196.078 | 679.776 / 679.766 |
| Desvios limite do círculo da cabeça (mm)                           | [Ada.e/i]          | 0.000 /   | -0.010  | 0.000 / -0.010    |
| Diâmetro da cabeça (mm)  | [dFa]              | 196.088   | 679.776 |                   |
| (mm)   | [dFa.e/i]          | 196.088 / | 196.078 | 679.776 / 679.766 |
| Diâmetro de círculo da cabeça (mm)                                 | [dNa]              | 196.088   | 679.776 |                   |
| Diâmetro de círculo da cabeça (mm)                                 | [dNa.e/i]          | 196.088 / | 196.078 | 679.776 / 679.766 |
| Diâmetro primitivo de funcionamento (mm)                           | [dw]               | 178.936   | 669.064 |                   |
| (mm)   | [dw.e/i]           | 178.949 / | 178.922 | 669.114 / 669.015 |
| Diâmetro do círculo do pé (mm)                                     | [df]               | 164.724   | 648.412 |                   |
| Fator de correção do dentado de geração                            | [xE.e/i]           | 0.3085/   | 0.2987  | 0.0855/ 0.0698    |
| Círculo do pé gerado com xE (mm)                                   | [df.e/i]           | 164.463 / | 164.325 | 647.931 / 647.711 |
| Folga da cabeça teórica (mm)                                       | [c]                | 1.750     | 1.750   |                   |
| Folga da cabeça efetiva (mm)                                       | [c.e/i]            | 2.137 /   | 1.959   | 1.986 / 1.849     |
| Diâmetro do círculo útil do pé (mm)                                | [dNf]              | 170.407   | 655.699 |                   |
| (mm)   | [dNf.e/i]          | 170.455 / | 170.366 | 655.761 / 655.644 |
| Diâmetro do círculo do perfil do pé (mm)                           | [dFf]              | 169.851   | 652.634 |                   |
| (mm)   | [dFf.e/i]          | 169.684 / | 169.597 | 652.211 / 652.018 |
| Reserve (dNf-dFf)/2 (mm)   | [cF.e/i]           | 0.429 /   | 0.341   | 1.871 / 1.717     |
| Altura da cabeça (mm)  | [ha=mn*(haP*+x+k)] | 9.222     | 7.771   |                   |
| (mm)   | [ha.e/i]           | 9.222 /   | 9.217   | 7.771 / 7.766     |
| Altura do pé (mm)  | [hf=mn*(hfP*-x)]   | 6.460     | 7.911   |                   |
| (mm)   | [hf.e/i]           | 6.591 /   | 6.659   | 8.151 / 8.261     |
| Ângulo de geração rel. dFa (°)                                     | [xsi_dFa.e/i]      | 36.907 /  | 36.901  | 26.645 / 26.642   |
| Ângulo de geração rel. dNa (°)                                     | [xsi_dNa.e/i]      | 36.907 /  | 36.901  | 26.645 / 26.642   |
| Ângulo de geração rel. dNf (°)                                     | [xsi_dNf.e/i]      | 15.071 /  | 14.950  | 20.804 / 20.772   |
| Ângulo de geração rel. dFf (°)                                     | [xsi_dFf.e/i]      | 13.981 /  | 13.853  | 19.817 / 19.762   |
| Altura do dente (mm)   | [h]                | 15.682    | 15.682  |                   |
| Número de dentes de substituição                                   | [zn]               | 30.130    | 112.658 |                   |
| Espessura de dente normal no círculo de cabeça (mm)                | [san]              | 4.614     | 5.672   |                   |
| (mm)   | [san.e/i]          | 4.517 /   | 4.457   | 5.498 / 5.412     |
| Espessura de dente normal no círculo da forma da cabeça (mm)       | [sFan]             | 4.614     | 5.672   |                   |
| (mm)   | [sFan.e/i]         | 4.517 /   | 4.457   | 5.498 / 5.412     |

|   |               |                              |                            |
|---|---------------|------------------------------|----------------------------|
| Largura do espaço normal no círculo do pé (mm)    | [efn]         | 0.000                        | 4.987                      |
| (mm)  | [efn.e/i]     | 0.000 / 0.000                | 5.013 / 5.025              |
| Velocidade de deslizamento máx. na cabeça (m/s)   | [vga]         | 0.548                        | 0.395                      |
| Deslizamento específico na cabeça                 | [zetaa]       | 0.437                        | 0.437                      |
| Deslizamento específico no pé                     | [zetaf]       | -0.776                       | -0.775                     |
| Deslizamento específico médio                     | [zetam]       | 0.437                        |                            |
| Fator de deslize na cabeça                        | [Kga]         | 0.259                        | 0.187                      |
| Fator de deslize no pé                            | [Kgf]         | -0.187                       | -0.259                     |
| Divisão de círculo de referência (mm)             | [pt]          | 24.265                       |                            |
| Divisão de círculo de base (mm)                   | [pbt]         | 22.517                       |                            |
| Divisão de pressão transversal (mm)               | [pet]         | 22.517                       |                            |
| Altura de inclinação (mm)                         | [pz]          | 1196.816                     | 4475.052                   |
| Divisão axial (mm)                                | [px]          | 52.035                       |                            |
| Comprimento da longitude de engrenagem (mm)       | [ga, e/i]     | 31.506 ( 31.587 / 31.404)    |                            |
| Comprimento T1-A, T2-A (mm)                       | [T1A, T2A]    | 21.588( 21.507/ 21.680)      | 143.321( 143.321/ 143.309) |
| Comprimento T1-B (mm)                             | [T1B, T2B]    | 30.577( 30.577/ 30.568)      | 134.332( 134.251/ 134.422) |
| Comprimento T1-C (mm)                             | [T1C, T2C]    | 34.797( 34.780/ 34.814)      | 130.111( 130.048/ 130.175) |
| Comprimento T1-D (mm)                             | [T1D, T2D]    | 44.104( 44.023/ 44.197)      | 120.805( 120.805/ 120.793) |
| Comprimento T1-E (mm)                             | [T1E, T2E]    | 53.094( 53.094/ 53.084)      | 111.815( 111.734/ 111.905) |
| Comprimento T1-T2 (mm)                            | [T1T2]        | 164.909 ( 164.828 / 164.990) |                            |
| Diâmetro do ponto de engrenagem individual B (mm) |               |                              |                            |
|   | [d-B]         | 175.825( 175.825/ 175.818)   | 672.392( 672.327/ 672.464) |
| Diâmetro do ponto de engrenagem individual D (mm) |               |                              |                            |
|   | [d-D]         | 186.963( 186.887/ 187.051)   | 662.047( 662.047/ 662.038) |
| Cobertura de cabeça                               | [eps]         | 0.813( 0.813/ 0.811)         | 0.587( 0.590/ 0.583)       |
| Comprimento mínimo da linha de contato (mm)       | [Lmin]        | 79.350                       |                            |
| Cobertura de perfil                               | [eps_a]       | 1.399                        |                            |
| Cobertura de perfil com desvios limite            | [eps_a.e/m/i] | 1.403 / 1.399 / 1.395        |                            |
| Coefficiente de cobertura                         | [eps_b]       | 1.000                        |                            |
| Cobertura total                                   | [eps_g]       | 2.400                        |                            |
| Cobertura total com desvios limite                | [eps_g.e/m/i] | 2.403 / 2.399 / 2.395        |                            |

## 2. FATORES DE INFLUÊNCIA GERAIS

|  |         | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 -- |
|--|---------|--------------------------|-----------------|
| Força tangencial nominal no círculo de referência (N)          | [Ft]    | 89368.2                  |                 |
| Força axial (N)  | [Fa]    | 0.0                      |                 |
| Força radial (N)   | [Fr]    | 35890.0                  |                 |
| Força normal (N)   | [Fnorm] | 104935.2                 |                 |
| Força tangencial nominal por mm (N/mm)                         | [w]     | 858.48                   |                 |
| Apenas para fins informativos: Forças no círculo rolante:      |         |                          |                 |
| Força tangencial nominal (N)                                   | [Ftw]   | 88722.9                  |                 |
| Força axial (N)  | [Faw]   | 0.0                      |                 |
| Força radial (N)   | [Frw]   | 37456.7                  |                 |
| Velocidade tangencial círculo de referência (m/s)              |         |                          |                 |
|  | [v]     | 2.10                     |                 |
| Velocidade tangencial círculo primitivo de funcionamento (m/s) | [v(dw)] |                          | 2.11            |
| Valor de entrada (μm)  | [yp]    | 0.9                      |                 |
| Valor de entrada (μm)  | [yf]    | 1.1                      |                 |
| Fator de correção  | [CM]    | 0.800                    |                 |
| Fator do corpo da engrenagem                                   | [CR]    | 1.000                    |                 |
| Fator de perfil de referência                                  | [CBS]   | 0.975                    |                 |
| Fator de material  | [E/Est] | 1.000                    |                 |
| Rigidez da mola individual (N/mm/μm)                           | [c']    | 13.742                   |                 |

|   |          |         |        |
|---|----------|---------|--------|
| Rigidez da mola de engrenagem (N/mm/μm)   | [cg]     | 17.857  |        |
| Massa reduzida (kg/mm)  | [mRed]   | 0.06624 |        |
| Velocidade de ressonância (min-1)   | [nE1]    | 6817    |        |
| Velocidade de referência (-)  | [N]      | 0.033   |        |
| Setor subcrítico  |          |         |        |
| Valor de entrada (μm)   | [ya]     | 0.9     |        |
| Distância entre mancais I do eixo do pinhão (mm)  | [l]      | 190.600 |        |
| Distância s do eixo do pinhão (mm)  | [s]      | 9.530   |        |
| Diâmetro externo do eixo do pinhão (mm)   | [dsh]    | 95.300  |        |
| Carga segundo Fig. 6.8, DIN 3990-1:1987 [-]   | 4        |         |        |
| (0:6.8a, 1:6.8b, 2:6.8c, 3:6.8d, 4:6.8e)  |          |         |        |
| Fator K' em conformidade com a Fig 6.8, DIN 3990-1:1987 [K']  | -1.00    |         |        |
| Sem efeito de apoio   |          |         |        |
| Desvio da linha de flancos, efetivo (μm)  | [Fby]    | 5.86    |        |
| de deformação dos eixos (μm)  | [fsh*B1] | 0.44    |        |
| (fsh (μm) = 4.38, B1= 0.10, fHb5 (μm) = 7.00)   |          |         |        |
| Linha de flancos: abaulada transversalmente com correção de ângulo de hélice (Fatores da norma ISO 9085:2002) |          |         |        |
| Posição da marca de contato do dente: ótimo   |          |         |        |
| de tolerâncias de fabricação (μm)   | [fma*B2] | 5.00    |        |
| (B2= 0.50)  |          |         |        |
| Desvio da linha de flancos, teórico (μm)  | [Fbx]    | 6.89    |        |
| Valor de entrada (μm)   | [yb]     | 1.03    |        |
| Fator dinâmico  | [KV]     | 1.003   |        |
| Fatores de largura - Flanco   | [KHb]    | 1.038   |        |
| - Pé do dente   | [KFb]    | 1.027   |        |
| - Raspagem (scuffing)   | [KBb]    | 1.038   |        |
| Fatores frontais - Flanco   | [KHα]    | 1.000   |        |
| - Pé do dente   | [KFα]    | 1.000   |        |
| - Raspagem (scuffing)   | [KBα]    | 1.000   |        |
| Fator de inclinação Raspagem (scuffing)   | [Kbg]    | 1.204   |        |
| Número de ciclos de carga (em milhões)  | [NL]     | 270.677 | 72.390 |

### 3. CAPACIDADE DE CARGA DO PÉ DO DENTE

Cálculo de fatores de perfil do dente segundo o método: B

|  |         | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 -- |
|--|---------|--------------------------|-----------------|
| Cálculo com deslocamento de perfil   | [x]     | 0.3271                   | 0.1199          |
| Fator do perfil do dente   | [YF]    | 1.13                     | 1.23            |
| Fator de correção de tensão  | [YS]    | 2.27                     | 2.24            |
| Ângulo de aplicação de força (°)   | [alfFn] | 21.26                    | 20.35           |
| Braço da alavanca de flexão (mm)   | [hF]    | 6.39                     | 7.53            |
| Espessura do pé do dente (mm)  | [sFn]   | 15.37                    | 15.99           |
| Raio do pé do dente (mm)   | [roF]   | 3.18                     | 3.08            |
| (hF* = 0.912/ 1.075 sFn* = 2.196/ 2.284 roF* = 0.455/ 0.440)                                       |         |                          |                 |
| (den (mm) = 216.886/793.937 dsFn(mm) = 167.335/651.167 alfsFn(°) = 30.00/ 30.00 qs = 2.414/ 2.593) |         |                          |                 |

|                             |        |       |
|-----------------------------|--------|-------|
| Fator de relação de contato | [Yeps] | 1.000 |
|-----------------------------|--------|-------|

|   |                        |            |            |
|---|------------------------|------------|------------|
| Fator helicoidal  | [Ybet]                 | 0.792      |            |
| Largura de dente determinante (mm)                            | [beff]                 | 52.05      | 52.05      |
| Tensão nominal do pé do dente (N/mm <sup>2</sup> )            | [sigF0]                | 248.33     | 267.91     |
| Tensão no pé do dente (N/mm <sup>2</sup> )                    | [sigF]                 | 409.45     | 441.73     |
| Tensão de pé do dente admissível de engrenagem de verificação |                        |            |            |
| Sensibilidade ao entalhe                                      | [YdrelT]               | 0.999      | 1.001      |
| Fator de superfície   | [YRrelT]               | 0.957      | 0.957      |
| Fator dimensional (pé do dente)                               | [YX]                   | 0.980      | 0.980      |
| Fator de fadiga a baixo número de ciclos                      | [YNT]                  | 1.000      | 1.000      |
|   | [YdrelT*YRrelT*YX*YNT] | 0.937      | 0.938      |
| Coeficiente de flexão alternada (fator de tensão média)       | [YM]                   | 1.000      | 1.000      |
| Carga em flanco esquerdo/direito (%):                         |                        | 100.0, 0.0 | 100.0, 0.0 |
| Fator de correção de tensão                                   | [Yst]                  | 2.00       |            |
| Yst*sigFlim (N/mm <sup>2</sup> )                              | [sigFE]                | 860.00     | 740.00     |
| Tensão de pé do dente admissível (N/mm <sup>2</sup> )         | [sigFP=sigFG/SFmin]    | 575.48     | 496.02     |
| Resistência-limite de pé do dente (N/mm <sup>2</sup> )        | [sigFG]                | 805.68     | 694.43     |
| Segurança nominal   | [SFmin]                | 1.40       | 1.40       |
| Fator de segurança para tensão do pé do dente                 | [SF=sigFG/sigF]        | 1.97       | 1.57       |
| Potência transmissível (kW)                                   | [kWRating]             | 263.53     | 210.54     |

#### 4. SEGURANÇA DOS FLANCOS

|   |                     | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 -- |
|---|---------------------|--------------------------|-----------------|
| Fator de zona   | [ZH]                | 2.247                    |                 |
| Fator de elasticidade ( $\sqrt{N/mm^2}$ )                     | [ZE]                | 189.812                  |                 |
| Fator de relação de contato                                   | [Zeps]              | 0.845                    |                 |
| Fator helicoidal  | [Zbet]              | 0.952                    |                 |
| Largura de dente determinante (mm)                            | [beff]              | 52.05                    |                 |
| Pressão de flancos nominal (N/mm <sup>2</sup> )               | [sigH0]             | 849.52                   |                 |
| Compressão de flancos no círculo rolante (N/mm <sup>2</sup> ) | [sigHw]             | 1096.66                  |                 |
| Fator de engrenagem individual                                | [ZB,ZD]             | 1.00                     | 1.00            |
| Compressão de flancos (N/mm <sup>2</sup> )                    | [sigHB, sigHD]      | 1096.66                  | 1096.66         |
| Fator de lubrificante (com NL)                                |                     |                          |                 |
|   | [ZL]                | 0.992                    | 0.992           |
| Fator de velocidade (com NL)                                  | [ZV]                | 0.965                    | 0.965           |
| Fator de rugosidade (com NL)                                  | [ZR]                | 1.001                    | 1.001           |
| Fator de combinação de material (com NL)                      | [ZW]                | 1.000                    | 1.000           |
| Fator de fadiga a baixo número de ciclos                      | [ZNT]               | 1.000                    | 1.000           |
|   | [ZL*ZV*ZR*ZNT]      | 0.958                    | 0.958           |
| Um pitting limitado permitido:                                | não                 |                          |                 |
| Fator dimensional (flanco)                                    | [ZX]                | 1.000                    | 1.000           |
| Pressão de flancos admissível (N/mm <sup>2</sup> )            | [sigHP=sigHG/SHmin] | 1437.36                  | 1169.06         |
| Resistência-limite a corrosão (N/mm <sup>2</sup> )            | [sigHG]             | 1437.36                  | 1169.06         |
| Segurança nominal   | [SHmin]             | 1.00                     | 1.00            |
| Segurança para pressão de flancos círculo rolante             | [SHw]               | 1.31                     | 1.07            |
| Segurança para pressão engrenagem individual                  | [SHBD=sigHG/sigHBD] | 1.31                     | 1.07            |
| (Segurança relativamente ao torque transmissível)             |                     |                          |                 |
|   | [(SHBD)^2]          | 1.72                     | 1.14            |
| Potência transmissível (kW)                                   | [kWRating]          | 322.10                   | 213.07          |

#### 4b. MICROPITTING SEGUNDO ISO/TR 15144-1:2014



Cálculo da espessura específica admissível para a película

Lubrificante nível de força em conformidade com a norma FVA, publicação 54/7

10 (Óleo: Klübersynth EG 4-150)

Dados de referência Teste FZG-C:

|  |             |       |
|--|-------------|-------|
| Torque (Nm)                                      | [T1Ref]     | 265.1 |
| Carga linear no ponto de contato A (N/mm)        | [FbbRef,A]  | 236.3 |
| Temperatura de óleo (°C)                         | [theOilRef] | 90.0  |
| Temperatura de massa (°C)                        | [theMRef]   | 115.7 |
| Temperatura de contato (°C)                      | [theBRef,A] | 188.7 |
| Espessura da folga de lubrificação (μm)          | [hRef,A]    | 0.071 |
| Espessura da película específica no teste (μm)   | [lamGFT]    | 0.141 |
| Fator de material                                | [WW]        | 0.82  |
| Espessura da película específica admissível (μm) | [lamGFP]    | 0.163 |

Resultado intermediário em conformidade com ISO/TR 15144:2014

|  |           |         |         |
|--|-----------|---------|---------|
| Coefficiente de atrito                         | [mym]     | 0.037   |         |
| Fator de lubrificante                          | [XL]      | 0.585   | (Input) |
| Fator de rugosidade                            | [XR]      | 0.828   |         |
| Temperatura de massa (°C)                      | [theM]    | 61.3    |         |
| Fator de Recuo da cabeça                       | [XCa (A)] | 1.664   |         |
| Fator de dissipação                            | [HV]      | 0.114   |         |
| Módulo de elasticidade de substituição (N/mm²) | [Er]      | 226374  |         |
| Coefficiente pressão viscosidade (m²/N)        | [alf38]   | 0.02033 |         |
| Viscosidade dinâmica (Ns/m²)                   | [etatM]   | 49.9    |         |
| Valor de rugosidade médio (μm)                 | [Ra]      | 0.6     |         |

Cálculo das velocidades, distribuição de carga e curvatura de flancos segundo método B, em conformidade com ISO/TR 15144-1:2014

|  |           |          |               |
|--|-----------|----------|---------------|
| Ca enquanto valor ótimo assumido no cálculo (0=não, 1=sim)                       | 1         | 1        |               |
| Cálculo no ponto (0:A, 1:AB, 2:B, 3:C, 4:D, 5:DE, 6:E, -1:No Point)              |           | 1        |               |
| Diâmetro (mm)  | [dy]      | 172.904  | 676.034       |
| Raio de curvatura de substituição (mm)   | [pred]    |          | 23.925        |
| Fator de aplicação da força  | [XY]      |          | 0.667         |
| (XY interpolated between XY(eps.b=0.8) and XY(eps.b=1.2) according ISO/TC60/WG6) |           |          |               |
| Compressão de flancos (N/mm²)  | [pH]      | 1363.296 |               |
| Compressão de flancos (N/mm²)  | [pdyn]    | 1759.910 |               |
| Espessura da película específica mínima (µm)                                     | [lamGFY]  | 0.266    | (hY=0.160 µm) |
| Segurança contra micropitting  | [Slam(B)] | 1.633    |               |
| (Resultados intermédios, ver arquivo: Micropitting 12.tmp)                       |           |          |               |

## 5. RESISTÊNCIA À RASPAGEM (SCUFFING)

Método de cálculo em conformidade com DIN 3990:1987

Fator de lubrificação (para tipo de lubrificação)

|  |           |   |        |
|--|-----------|---|--------|
|  | [XS]      | 1.000                                   |        |
| Teste de gripagem e nível de carga                         | [FZGtest] | FZG - Test A / 8.3 / 90 (ISO 14635 - 1) | 14     |
| Coefficiente relativo de estrutura (gripagem)              | [XWrelT]  | 1.000                                   |        |
| Coefficiente de contato térm. (N/mm/s <sup>0.5</sup> /K)   | [BM]      | 13.780                                  | 13.780 |
| Recuo da cabeça determinante (μm)                          | [Ca]      | 70.00                                   | 70.00  |
| Recuo ótimo da cabeça (μm)                                 | [CeFF]    | 67.23                                   |        |
| Ca enquanto valor ótimo assumido no cálculo (0=não, 1=sim) |           | 1                                       | 1      |
| Largura de dente determinante (mm)                         | [beff]    | 52.050                                  |        |
| Força tangencial/largura de dente determinantes (N/mm)     | [wBt]     | 1722.293                                |        |
| Fator de ângulo  | [Xalfbet] | 1.001                                   |        |
| (ε1:0.813, ε2:0.587)                                       |           |   |        |

|   |             |                  |
|---|-------------|------------------|
| Critério de temperatura de flash  |             |                  |
| Temperatura de massa (°C)   | [theMB]     | 88.28            |
| (theMB = theoil + XS*0.47*theflamax)  |             |                  |
| temperatura instantânea máxima (°C)   | [theflamax] | 60.17            |
| Temperatura de raspagem (scuffing) (°C)   | [theS]      | 546.29           |
| Coordenada Gamma (local da temp. máxima)  | [Gamma]     | 0.267            |
| [Gamma.A]=-0.380 [Gamma.E]=0.526  |             |                  |
| Temp. máxima contato. (°C)  | [theB]      | 148.45           |
| Fator de flash (°K*N <sup>-1</sup> .75*s <sup>1.5</sup> *m <sup>-1.5</sup> *mm) | [XM]        | 50.058           |
| Fator de geometria  | [XB]        | 0.124            |
| Fator de aplicação da força   | [XGam]      | 1.000            |
| Viscosidade dinâmica (mPa*s)  | [etaM]      | 20.74 ( 60.0 °C) |
| Coeficiente de atrito   | [mym]       | 0.113            |
| Segurança nominal   | [SBmin]     | 2.000            |
| Coeficiente de segurança para gripagem (scuffing) (temperatura instantânea)     | [SB]        | 5.497            |
| Critério de temperatura integral  |             |                  |
| Temperatura de massa (°C)   | [theMC]     | 72.52            |
| (theMC = theoil + XS*0.70*theflaint)  |             |                  |
| temperatura instantânea em media (°C)   | [theflaint] | 17.89            |
| Temperatura integral de raspagem (scuffing) (°C)                                | [theSint]   | 546.29           |
| Fator de flash (°K*N <sup>-1</sup> .75*s <sup>1.5</sup> *m <sup>-1.5</sup> *mm) | [XM]        | 50.058           |
| Fator de relação de contato   | [Xeps]      | 0.277            |
| Viscosidade dinâmica (mPa*s)  | [etaOil]    | 52.51 ( 60.0 °C) |
| Coeficiente de atrito determinado   | [mym]       | 0.096            |
| Fator de geometria  | [XBE]       | 0.230            |
| Fator de engrenagem   | [XQ]        | 1.000            |
| Fator de Recuo da cabeça  | [XCa]       | 1.454            |
| Temperatura de flancos integral (°C)  | [theint]    | 99.36            |
| Segurança nominal   | [SSmin]     | 1.800            |
| Fator de segurança para raspagem (scuffing) (T. inter.)                         | [SSint]     | 5.498            |
| Seg. p. torque de transmissão (Int.-T.)   | [SSL]       | 12.355           |

## 6. MEDIDA DE ENSAIO PARA A ESPESSURA DO DENTE

|   |           | ----- ENGRENAGEM 1 ----- | ENGRENAGEM 2 --   |
|---|-----------|--------------------------|-------------------|
|   |           | DIN 3967 cd25            | DIN 3967 cd25     |
| Tolerância de espessura de dente  |           | -0.095 / -0.145          | -0.175 / -0.255   |
| Desvio da espessura de dente na seção normal (mm)                             | [As.e/i]  |                          |                   |
| Número de dentes de medida  | [k]       | 4.000                    | 13.000            |
| Medida entre dentes sem folgas (mm)   | [Wk]      | 76.876                   | 270.038           |
| Medida entre dentes efetiva (mm)  | [Wk.e/i]  | 76.787 / 76.740          | 269.873 / 269.798 |
| (mm)  | [ΔWk.e/i] | -0.089 / -0.136          | -0.164 / -0.240   |
| Diâmetro do circuito de medição (mm)  | [dMWk.m]  | 179.270                  | 664.273           |
| > Medida entre dentes engrenagem 2 não mensurável (engrenagem muito estreita) |           |                          |                   |
| Diâmetro de elemento de medição teor. (mm)                                    | [DM]      | 12.598                   | 11.812            |
| Diâmetro efet. de elemento de medição (mm)                                    | [DMeff]   | 14.000                   | 12.000            |
| Medida radial de uma esfera sem folgas (mm)                                   | [MrK]     | 102.266                  | 341.302           |
| Medida radial de uma esfera (mm)  | [MrK.e/i] | 102.169 / 102.118        | 341.074 / 340.969 |
| Diâmetro do circuito de medição (mm)  | [dMMr.m]  | 184.206                  | 665.802           |
| Medida diametral de duas esferas, sem folga (mm)                              | [MdK]     | 204.089                  | 682.603           |
| Medida diametral de duas esferas (mm)   | [MdK.e/i] | 203.895 / 203.793        | 682.147 / 681.938 |
| Medida diametral de um cilindro, sem folga (mm)                               | [MdR]     | 204.533                  | 682.603           |

|  |                  |                                     |
|--|------------------|-------------------------------------|
| Medida sobre rolos em conformidade com DIN 3960 (mm)             | [MdR.e/i]        | 204.339 / 204.236 682.147 / 681.938 |
| Measurement over 2 pins (free) according to AGMA 2002 (mm)       | [dk2f.e/i]       | 203.748 / 203.646 0.000 / 0.000     |
| Measurement over 2 pins (transverse) according to AGMA 2002 (mm) | [dk2t.e/i]       | 204.769 / 204.667 0.000 / 0.000     |
| Measurement over 3 pins (axial) according to AGMA 2002 (mm)      | [dk3A.e/i]       | 204.339 / 204.236 682.147 / 681.938 |
| Espeçura cordal do dente sem folgas (mm)                         | [sc]             | 12.655 11.606                       |
| Espeçura cordal do dente efetiva (mm)                            | [sc.e/i]         | 12.560 / 12.510 11.431 / 11.351     |
| Altura acima da corda a partir de da.m (mm)                      | [ha]             | 9.405 7.810                         |
| Espeçura de dente (Arc) (mm)                                     | [sn]             | 12.662 11.606                       |
| (mm)   | [sn.e/i]         | 12.567 / 12.517 11.431 / 11.351     |
| Distância entre eixos sem folga (mm)                             | [aControl.e/i]   | 423.644 / 423.472                   |
| Distância entre eixos sem folga, desvios limite (mm)             | [jta]            | -0.356 / -0.528                     |
| dNf.i com aControl (mm)  | [dNf0.i]         | 169.737 654.774                     |
| Reserva (dNf0.i-dFf.e)/2 (mm)                                    | [cF0.i]          | 0.027 1.282                         |
| Folga da cabeça (mm)   | [c0.i(aControl)] | 1.463 1.353                         |
| Desvio limite da distância entre eixos (mm)                      | [Aa.e/i]         | 0.032 / -0.032                      |
| Folga na circunferência primitiva de Aa (mm)                     | [jtw_Aa.e/i]     | 0.027 / -0.027                      |
| Folga radial (mm)  | [jrw]            | 0.560 / 0.325                       |
| Folga na circunferência primitiva (seção transversal) (mm)       | [jtw]            | 0.471 / 0.273                       |
| Folga de engrenamento normal (mm)                                | [jnw]            | 0.401 / 0.233                       |
| Ângulo de torção na entrada com saída imobilizada:               |                  |                                     |
| Ângulo de torção total (°)                                       | [j.tSys]         | 0.3017/0.1751                       |

## 7. TOLERÂNCIAS DO DENTADO

----- ENGRENAGEM 1 ----- ENGRENAGEM 2 --

Em conformidade com

DIN 3961:1978

|  |             |       |       |
|--|-------------|-------|-------|
| Qualidade de engrenagem                                | [Q-DIN3961] | 6     | 6     |
| Erro de forma de perfil (µm)                           | [ff]        | 14.00 | 14.00 |
| Variação de ângulo de perfil (µm)                      | [fHa]       | 9.00  | 9.00  |
| Erro total de perfil (µm)                              | [Ff]        | 16.00 | 16.00 |
| Desvio de perfil da linha de flancos (µm)              | [fbf]       | 8.00  | 8.00  |
| Desvio de ângulo de linha de flancos (µm)              | [fHb]       | 10.00 | 10.00 |
| Desvio total da linha de flancos (µm)                  | [Fb]        | 13.00 | 13.00 |
| Desvio da separação de engrenagem (µm)                 | [fpe]       | 11.00 | 12.00 |
| Desvio individual do passo (µm)                        | [fp]        | 11.00 | 12.00 |
| Salto de divisão (µm)                                  | [fu]        | 13.00 | 15.00 |
| Desvio total do passo (µm)                             | [Fp]        | 37.00 | 49.00 |
| Desvio de passo por setor através de z/8 (µm)          | [Fpz/8]     | 24.00 | 31.00 |
| Desvio da concentricidade (µm)                         | [Fr]        | 28.00 | 35.00 |
| Variação de espessura de dente (µm)                    | [Rs]        | 16.00 | 21.00 |
| Divergência de engrenamento sobre um único flanco (µm) | [Fi]        | 43.00 | 52.00 |
| Salto de engrenamento sobre um flanco (µm)             | [fi]        | 19.00 | 20.00 |
| Erro composto radial (µm)                              | [Fi"]       | 31.00 | 38.00 |
| Salto de engrenamento sobre dois flancos (µm)          | [fi"]       | 14.00 | 17.00 |

Tolerâncias aplicáveis à posição do eixo (recomendação em conformidade com a norma ISO TR 10064-3:1996, qualidade

6)

Valor máximo para desvio do eixo (µm) [fSigbet] 31.13 (Fb=17.00)

Valor máximo para inclinação do eixo ( $\mu\text{m}$ ) [fSigdel] 62.25

## 8. DADOS COMPLEMENTARES

|   |             |         |          |
|---|-------------|---------|----------|
| Massas (kg)   | [m]         | 8.438   | 184.421  |
| Massa total (kg)  | [m]         | 192.860 |          |
| Momento de inércia (sistema relativo à entrada):                            |             |         |          |
| Cálculo sem ter em conta o perfil exato do dente                            |             |         |          |
| Engrenagens individualmente ((da+df)/2...di) ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ) |             |         |          |
|   | [TraeghMom] | 0.05651 | 14.52883 |
| System ((da+df)/2...di) ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )                      | [TraeghMom] | 1.09568 |          |
| Rigidez circunferencial na entrada com saída imobilizada:                   |             |         |          |
| Rigidez circunferencial ( $\text{MNm/rad}$ )                                | [cr]        | 12.538  |          |
| Torção sob torque nominal ( $^\circ$ )                                      | [delcr]     | 0.036   |          |
| Coefficiente de atrito médio (segundo Niemann)                              | [mum]       | 0.039   |          |
| Deslizamento de desgaste segundo Niemann                                    | [zetw]      | 0.611   |          |
| Dissipação de potência do dente devido a carga (kW)                         |             |         |          |
|   | [PVZ]       | 0.838   |          |
| (grau de eficiência dos dentes (%))   | [etaz]      | 99.553  |          |
| Nível de pressão acústica (em conformidade com Masuda)                      |             |         |          |
|   | [dB(A)]     | 84.9    |          |

## 9. CORREÇÕES E CONFIRMAÇÃO DA FORMA DO PERFIL DO DENTE

Correções de linhas de flancos e perfil para engrenagem

1

### Simetricamente (ambos os flancos)

|                           |                            |                   |                 |
|---------------------------|----------------------------|-------------------|-----------------|
| - Recuo da cabeça, linear | Caa = 70.000 $\mu\text{m}$ | LCa = 0.642*mn    | dCa = 191.369mm |
| - Recuo do pé, linear     | Caf = 50.000 $\mu\text{m}$ | LCf = 0.853*mn    | dCf = 172.904mm |
| - Abaulamento transversal | Cb = 10.000 $\mu\text{m}$  | (rcrown=177310mm) |                 |

Correções de linhas de flancos e perfil para engrenagem

2

### Simetricamente (ambos os flancos)

|                           |                            |                   |                 |
|---------------------------|----------------------------|-------------------|-----------------|
| - Recuo da cabeça, linear | Caa = 70.000 $\mu\text{m}$ | LCa = 0.642*mn    | dCa = 676.034mm |
| - Recuo do pé, linear     | Caf = 50.000 $\mu\text{m}$ | LCf = 1.388*mn    | dCf = 658.819mm |
| - Abaulamento transversal | Cb = 10.000 $\mu\text{m}$  | (rcrown=177310mm) |                 |

Controle do recuo da cabeça

|  |          |             |             |
|--|----------|-------------|-------------|
| Diâmetro (mm)                                      | [dcheck] | 195.938     | 679.626     |
| Recuo da cabeça esquerdo/direito ( $\mu\text{m}$ ) | [Ca L/R] | 67.9 / 67.9 | 67.3 / 67.3 |

Dados para cálculo do perfil do dente:

Dados inexistentes.

## 10. VIDA ÚTIL, DANO

|                                   |         |      |
|-----------------------------------|---------|------|
| Segurança nominal pé do dente     | [SFmin] | 1.40 |
| Segurança nominal flanco do dente | [SHmin] | 1.00 |

Vida útil (calculada com seguranças nominais):

|                                   |        |           |
|-----------------------------------|--------|-----------|
| Tempo de vida útil do sistema (h) | [Hatt] | > 1000000 |
|-----------------------------------|--------|-----------|

Tempo de vida útil do pé do dente (h) [HFatt] 1e+006 1e+006

Tempo de vida útil do flanco do dente (h) [HHatt] 1e+006 1e+006

Indicação: A indicação 1e+006 h significa que a vida útil é > 1.000.000 h.

Dano calculado com base na vida útil nominal [H] ( 20000.0 h)

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| F1%  | F2%  | H1%  | H2%  |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Cálculo dos fatores para a confirmação da confiabilidade R(t) em conformidade com B.Bertsche, com distribuição Weibull:

$R(t) = 100 * \text{Exp}(-((t^{\text{fac}} - t_0)/(T - t_0))^b) \%$ ; t (h)

| Engr<br>enag<br>em |                 | fac   | b   | t0         | T          | R(H)%  |
|--------------------|-----------------|-------|-----|------------|------------|--------|
| 1                  | Pé do dente     | 13534 | 1.7 | 9.654e+029 | 1.484e+030 | 100.00 |
| 1                  | Flanco do dente | 13534 | 1.3 | 9.014e+029 | 4.295e+030 | 100.00 |
| 2                  | Pé do dente     | 3620  | 1.7 | 9.654e+029 | 1.484e+030 | 100.00 |
| 2                  | Flanco do dente | 3620  | 1.3 | 9.014e+029 | 4.295e+030 | 100.00 |

Confiabilidade da configuração com vida útil nominal (%) 100.00 (Bertsche)

#### **OBSERVAÇÕES:**

- Indicações com [e/i] significam: Valor máximo [e] e mínimo [i] perante Tomada em conta de todas as tolerâncias  
Indicações com [m] significam: Valor médio na tolerância
- Em existindo folga de engrenamento, são tidas em conta as tolerâncias de distâncias entre eixos e os desvios limite para a espessura do dente  
. São indicadas as folgas máxima e mínima, em conformidade com os maiores e menores desvios limite.  
O cálculo é realizado para o círculo rolante.
- Detalhes sobre método de cálculo:  
cg segundo o método B  
KV segundo o método B  
KHb, KFb segundo o método C  
KH<sub>a</sub>, KF<sub>a</sub> em conformidade com o método B

Fim do Relatório linhas: 601

## Veio A (Veio de entrada)

KISSsoft Release 03/2017 F

KISSsoft University license - Universidade do Porto

Arquivo

Nome : Mauro Filipe Rodrigues Domingues

Modificado por: up201404793

Data: Junho de 2019

Hora: -

## Cálculo de veios, eixos e suportes

### Dados de entrada

Sistema de coordenadas de eixo: ver Fig. W-002

|   |               |
|---|---------------|
| Designação  | Veio A        |
| Desenho   |               |
| Posição de partida (mm)   | -143.000      |
| Comprimento (mm)  | 313.000       |
| Velocidade (1/min)  | 1000.00       |
| Sentido de rotação: dos ponteiros do relógio                          |               |
| Material (Entrada própria)  | 42 CrMo 4 (1) |
| Módulo de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )                           | 206000.000    |
| Número de Poisson nu  | 0.300         |
| Densidade (kg/m <sup>3</sup> )  | 7830.000      |
| Coefficiente de dilatação térmica (10 <sup>-6</sup> /K)               | 11.500        |
| Temperatura (°C)  | 20.000        |
| Peso do eixo (kg)   | 13.059        |
| (Observação: Peso válido para o eixo sem ter em conta as engrenagens) |               |
| Peso do eixo, incluindo massas adicionais (kg)                        | 19.391        |
| Momento de inércia de massa (kg*m <sup>2</sup> )                      | 0.036         |
| Momento de inércia GD2 (Nm <sup>2</sup> )                             | 1.429         |
| Peso no sentido ( 0.000, 0.000, -1.000)                               |               |
| Engrenagens consideradas como massas                                  |               |
| Deformações por cisalhamento são tidas em conta                       |               |
| Fator de correção de cisalhamento                                     | 1.100         |
| O ângulo de pressão de mancais de rolamento é tido em conta           |               |
| Zona de tolerância: Valor médio                                       |               |
| Temperatura de referência (°C)  | 20.000        |

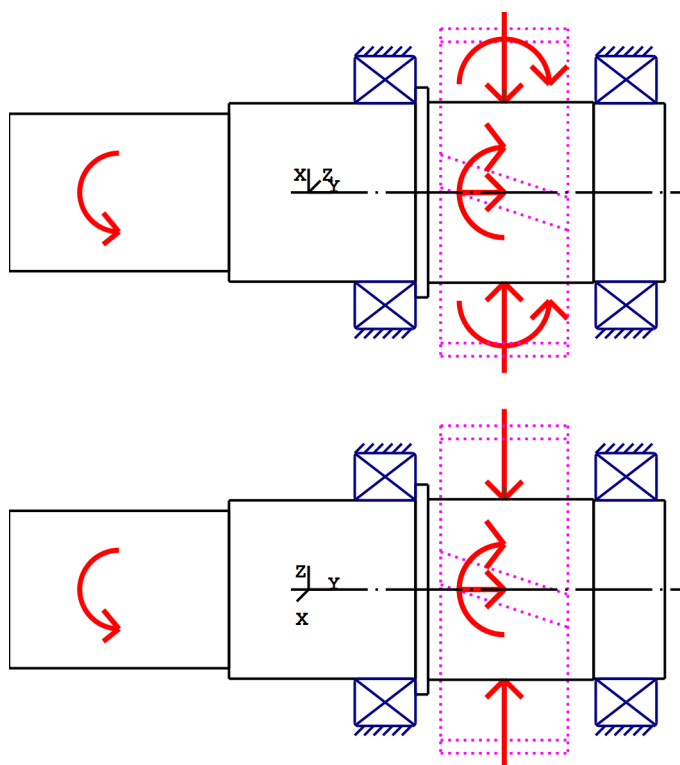


Figura: Aplicações da carga

#### Definição do eixo (Veio A)

##### Contorno externo

Cilindro (cil1) 0.000mm ... 105.000mm

|                  |      |          |
|------------------|------|----------|
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 75.0000  |
| Comprimento (mm) | [l]  | 105.0000 |
| Rugosidade (μm)  | [Rz] | 8.0000   |

Chanfro esquerda (Chanfro esquerda)

l=2.00 (mm), alpha=45.00 (°)

Ranhura da chaveta (Ranhura da chaveta)

0.000mm ... 100.000mm

l=100.00 (mm), i=1, Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2μm/125μin)

Raio direita (Raio direita)

r=1.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2μm/125μin)

Cilindro (cil2) 105.000mm ... 194.000mm

|                  |      |         |
|------------------|------|---------|
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 85.0000 |
| Comprimento (mm) | [l]  | 89.0000 |
| Rugosidade (μm)  | [Rz] | 8.0000  |

Entalhe direita (Entalhe direita)

r=0.60 (mm), t=0.30 (mm), l=4.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2μm/125μin)

Entrada própria, Forma B, FKM

Entalhe retangular (Entalhe retangular)

b=5.00 (mm), t=0.50 (mm), r=0.50 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

|                  |      |          |                         |
|------------------|------|----------|-------------------------|
| Cilindro (cil3)  |      |          | 194.000mm ... 200.000mm |
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 100.0000 |                         |
| Comprimento (mm) | [l]  | 6.0000   |                         |
| Rugosidade (µm)  | [Rz] | 8.0000   |                         |

|                  |      |         |                         |
|------------------|------|---------|-------------------------|
| Cilindro (cil4)  |      |         | 200.000mm ... 279.000mm |
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 86.0000 |                         |
| Comprimento (mm) | [l]  | 79.0000 |                         |
| Rugosidade (µm)  | [Rz] | 8.0000  |                         |

Raio esquerda (Raio esquerda)

r=1.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

Ranhura da chaveta (Ranhura da chaveta)

202.000mm ... 272.000mm

l=70.00 (mm), i=1, Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

|                  |      |         |                         |
|------------------|------|---------|-------------------------|
| Cilindro (cil5)  |      |         | 279.000mm ... 313.000mm |
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 85.0000 |                         |
| Comprimento (mm) | [l]  | 34.0000 |                         |
| Rugosidade (µm)  | [Rz] | 8.0000  |                         |

Raio esquerda (Raio esquerda)

r=0.50 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

Chanfro direita (Chanfro direita)

l=2.00 (mm), alpha=45.00 (°)

## Forças

Tipo do elemento de força

**Acoplamento/motor**

Designação no modelo

Coupling1(Boundary1)

Posição no eixo (mm)

[ylocal]

52.5000

Posição no sistema global (mm)

[yglobal]

-90.5000

Diâmetro efetivo (mm)

75.0000

Fator força radial (-)

0.0000

Direção da força radial (°)

0.0000

Fator força axial (-)

0.0000

Comprimento da aplicação da força (mm)

105.0000

Potência (kW)

375.0000 acionado (entrada)

Torque (Nm)

3580.9862

Força axial (N)

0.0000

Força transversal X (N)

0.0000

Força transversal Z (N)

0.0000

Momento fletor X (Nm)

0.0000

Momento fletor Z (Nm)

0.0000

Massas (kg)

0.0000

Momento de inércia de massa Jp (kg\*m²)

0.0000

Momento de inércia de massa Jxx (kg\*m²)

0.0000

Momento de inércia de massa Jzz (kg\*m²)

0.0000

Excentricidade (mm)

0.0000



|  |           |                              |
|--|-----------|------------------------------|
| Tipo do elemento de força  |           | <b>Engrenagem cilíndrica</b> |
| Designação no modelo   |           | z1 (engrenamento z1/z2)      |
| Posição no eixo (mm)   | [ylocal]  | 236.3500                     |
| Posição no sistema global (mm)                                     | [yglobal] | 93.3500                      |
| Diâmetro primitivo de funcionamento (mm)                           |           | 156.0736                     |
| Ângulo oblíquo (°)   |           | 15.0721 direita              |
| Ângulo de pressãoÂngulo de pressão de operação na seção normal (°) |           | 20.7234                      |
| Posição do contato (°)   |           | 180.0000                     |
| Comprimento da aplicação da força (mm)                             |           | 60.7000                      |
| Potência (kW)  |           | 187.5000 acionante (saída)   |
| Torque (Nm)  |           | -1790.4931                   |
| Força axial (N)  |           | 6178.8496                    |
| Força transversal X (N)  |           | 8989.8797                    |
| Força transversal Z (N)  |           | -22944.2118                  |
| Momento fletor X (Nm)  |           | -0.0000                      |
| Momento fletor Z (Nm)  |           | -482.1777                    |

|  |           |                              |
|--|-----------|------------------------------|
| Tipo do elemento de força  |           | <b>Engrenagem cilíndrica</b> |
| Designação no modelo   |           | z1 (engrenamento z1/z4)      |
| Posição no eixo (mm)   | [ylocal]  | 236.3500                     |
| Posição no sistema global (mm)                                     | [yglobal] | 93.3500                      |
| Diâmetro primitivo de funcionamento (mm)                           |           | 156.0736                     |
| Ângulo oblíquo (°)   |           | 15.0721 direita              |
| Ângulo de pressãoÂngulo de pressão de operação na seção normal (°) |           | 20.7234                      |
| Posição do contato (°)   |           | 0.0000                       |
| Comprimento da aplicação da força (mm)                             |           | 60.7000                      |
| Potência (kW)  |           | 187.5000 acionante (saída)   |
| Torque (Nm)  |           | -1790.4931                   |
| Força axial (N)  |           | 6178.8496                    |
| Força transversal X (N)  |           | -8989.8797                   |
| Força transversal Z (N)  |           | 22944.2118                   |
| Momento fletor X (Nm)  |           | -0.0000                      |
| Momento fletor Z (Nm)  |           | 482.1777                     |

## Mancal

|  |                   |   |
|--|-------------------|---|
| Designação no modelo                                     |                   | Rol 1   |
| Tipo de mancal   |                   | Koyo 32017JR                                  |
| Design do mancal   |                   | Mancal de rolo de contato cônico (fila única) |
| Posição do mancal (mm)                                   | [ylocal]          | 179.500                                       |
| Posição do mancal (mm)                                   | [yglobal]         | 36.500  |
| Fixação do anel externo                                  |                   | Mancal fixo colocado do lado esquerdo         |
| Diâmetro interno (mm)                                    | [d]               | 85.000  |
| Diâmetro externo (mm)                                    | [D]               | 130.000                                       |
| Largura (mm)   | [b]               | 29.000  |
| Raio de canto (mm)                                       | [r]               | 1.500   |
| O ângulo de pressão do mancal é tido em conta no cálculo |                   |   |
| Posição (ponto médio de pressão)                         |                   | (mm) 193.0000                                 |
| Deslocamento anel externo na direção X (mm)              | [δ <sub>x</sub> ] | 0.000   |
| Deslocamento anel externo na direção Y (mm)              | [δ <sub>y</sub> ] | 0.021   |
| Deslocamento anel externo na direção Z (mm)              |                   |   |

|   |                       |         |
|---|-----------------------|---------|
|   | [ $\delta_z$ ]        | 0.000   |
| Classificação da carga estática (kN)        | [C <sub>0</sub> ]     | 234.000 |
| Classificação da carga dinâmica básica (kN) |                       |         |
|   | [C]                   | 189.000 |
| Classificação de carga fadiga (kN)          | [C <sub>u</sub> ]     | 35.500  |
| Valores para a geometria aproximada:        |                       |         |
| Classificação da carga dinâmica básica (kN) |                       |         |
|   | [C <sub>theo</sub> ]  | 0.000   |
| Classificação da carga estática (kN)        | [C <sub>0theo</sub> ] | 0.000   |

|                      |   |
|----------------------|---|
| Designação no modelo | Rol 2   |
| Tipo de mancal       | Koyo 32017JR                                  |
| Design do mancal     | Mancal de rolo de contato cônico (fila única) |

|  |                        |         |                                      |
|--|------------------------|---------|--------------------------------------|
| Posição do mancal (mm)                                   | [y <sub>lokal</sub> ]  | 294.500 |                                      |
| Posição do mancal (mm)                                   | [y <sub>global</sub> ] | 151.500 |                                      |
| Fixação do anel externo                                  |                        |         | Mancal fixo colocado do lado direito |
| Diâmetro interno (mm)                                    | [d]                    | 85.000  |                                      |
| Diâmetro externo (mm)                                    | [D]                    | 130.000 |                                      |
| Largura (mm)   | [b]                    | 29.000  |                                      |
| Raio de canto (mm)                                       | [r]                    | 1.500   |                                      |
| O ângulo de pressão do mancal é tido em conta no cálculo |                        |         |                                      |
| Posição (ponto médio de pressão)                         |                        |         | (mm) 281.0000                        |
| Classificação da carga estática (kN)                     | [C <sub>0</sub> ]      | 234.000 |                                      |
| Classificação da carga dinâmica básica (kN)              |                        |         |                                      |
|  | [C]                    | 189.000 |                                      |
| Classificação de carga fadiga (kN)                       | [C <sub>u</sub> ]      | 35.500  |                                      |
| Valores para a geometria aproximada:                     |                        |         |                                      |
| Classificação da carga dinâmica básica (kN)              |                        |         |                                      |
|  | [C <sub>theo</sub> ]   | 0.000   |                                      |
| Classificação da carga estática (kN)                     | [C <sub>0theo</sub> ]  | 0.000   |                                      |

-----

Eixo 'Shaft2': A massa do seguinte elemento é tida em conta (y= 236.3500 (mm)): Engrenagem cilíndrica 'z3(GearPair\_const1)'  
m (yS= 236.3500 (mm)): 6.3320 (kg)  
Jp: 0.0251 (kg\*m<sup>2</sup>), Jxx: 0.0145 (kg\*m<sup>2</sup>), Jzz: 0.0145 (kg\*m<sup>2</sup>)

## **Resultados**

### **Eixo**

|                         |           |
|-------------------------|-----------|
| Deflexão máxima (μm)    | 0.213     |
| Posição do máximo (mm)  | -143.000  |
| Centro de massa (mm)    | 165.573   |
| Soma da carga axial (N) | 12357.699 |
| Torção sob torque (°)   | -0.108    |

### **Mancal**

|  |                            |       |    |
|--|----------------------------|-------|----|
| Probabilidade de falha   | [n]                        | 10.00 | %  |
| Folga axial  | [u <sub>A</sub> ]          | 10.00 | μm |
| Lubrificante   | Óleo: Klübersynth EG 4-150 |       |    |
| Lubrificante com aditivos, cujo efeito foi avaliado em mancais de rolamento.       |                            |       |    |
| Lubrificação de óleo sem filtragem o com filtro de fluxo paralelo, ISO4406 -/19/16 |                            |       |    |
| Lubrificante - Temperatura de funcionamento  | [T <sub>B</sub> ]          | 60.00 | °C |
| Valor-limite para fator aISO   | [a <sub>ISOmax</sub> ]     | 50.00 |    |
| Nível do óleo  | [h <sub>oil</sub> ]        | 0.00  | mm |
| Lubrificação por imersão em óleo   |                            |       |    |

Mancal de rolamento clássico (considerar ângulo de pressão)

#### Eixo 'Veio A' Mancal de rolamento 'Rol 1'

|   |                      |           |                    |
|---|----------------------|-----------|--------------------|
| Posição (coordenada Y)  | [y]                  | 179.50    | mm                 |
| carga dinamicamente equivalente   | [P]                  | 5.72      | kN                 |
| Carga equivalente   | [P <sub>0</sub> ]    | 3.21      | kN                 |
| Fator para probabilidade de falha   | [a <sub>1</sub> ]    | 1.000     |                    |
| Fator modificador de vida   | [a <sub>ISO</sub> ]  | 19.982    |                    |
| Vida útil nominal rolamento   | [L <sub>nh</sub> ]   | > 1000000 | h                  |
| Vida útil modificada rolamento  | [L <sub>nmh</sub> ]  | > 1000000 | h                  |
| Viscosidade operacional   | [v]                  | 62.57     | mm <sup>2</sup> /s |
| Fator de segurança estático   | [S <sub>0</sub> ]    | 72.87     |                    |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>x</sub> ]    | 0.000     | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>y</sub> ]    | 4.149     | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>z</sub> ]    | 0.200     | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>r</sub> ]    | 0.200     | kN (90°)           |
| Torque de reação do mancal  | [M <sub>x</sub> ]    | 2.69      | Nm                 |
| Torque de reação do mancal  | [M <sub>y</sub> ]    | 0.00      | Nm                 |
| Torque de reação do mancal  | [M <sub>z</sub> ]    | -0.00     | Nm                 |
| Torque de reação do mancal  | [M <sub>r</sub> ]    | 2.69      | Nm (0°)            |
| Nível do óleo   | [H]                  | 0.000     | mm                 |
| Torque de atrito independentemente da carga[M <sub>0</sub> ]                              |                      | 0.587     | Nm                 |
| Torque de atrito dependendo da carga  | [M <sub>1</sub> ]    | 0.485     | Nm                 |
| Torque de atrito rolamento de rolos cilíndricos[M <sub>2</sub> ]                          |                      | 0.000     | Nm                 |
| Torque de atrito vedações conforme especificado no catálogo principal 4000/IV T DE: 1994  |                      |           |                    |
| Torque de fricção   | [M <sub>loss</sub> ] | 1.073     | Nm                 |
| Potência dissipada  | [P <sub>loss</sub> ] | 112.326   | W                  |
| O torque de atrito é calculado em conformidade com as indicações do catálogo SKF de 1994. |                      |           |                    |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>x</sub> ]    | 0.000     | μm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>y</sub> ]    | 11.000    | μm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>z</sub> ]    | -0.000    | μm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>r</sub> ]    | 0.000     | μm                 |
| Inclinação do mancal  | [r <sub>x</sub> ]    | 0.001     | mrاد (0')          |
| Inclinação do mancal  | [r <sub>y</sub> ]    | -1.421    | mrاد (-4.88')      |
| Inclinação do mancal  | [r <sub>z</sub> ]    | 0.000     | mrاد (0')          |
| Inclinação do mancal  | [r <sub>r</sub> ]    | 0.001     | mrاد (0')          |

#### Eixo 'Veio A' Mancal de rolamento 'Rol 2'

|                                   |                     |          |    |
|-----------------------------------|---------------------|----------|----|
| Posição (coordenada Y)            | [y]                 | 294.50   | mm |
| carga dinamicamente equivalente   | [P]                 | 22.45    | kN |
| Carga equivalente                 | [P <sub>0</sub> ]   | 12.38    | kN |
| Fator para probabilidade de falha | [a <sub>1</sub> ]   | 1.000    |    |
| Fator modificador de vida         | [a <sub>ISO</sub> ] | 1.469    |    |
| Vida útil nominal rolamento       | [L <sub>nh</sub> ]  | 20225.92 | h  |
| Vida útil modificada rolamento    | [L <sub>nmh</sub> ] | 29720.98 | h  |

|   |                      |         |                    |
|---|----------------------|---------|--------------------|
| Viscosidade operacional   | [v]                  | 62.57   | mm <sup>2</sup> /s |
| Fator de segurança estático   | [S <sub>0</sub> ]    | 18.90   |                    |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>x</sub> ]    | 0.000   | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>y</sub> ]    | -16.506 | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>z</sub> ]    | -0.009  | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>r</sub> ]    | 0.009   | kN (-90°)          |
| Torque de reação do mancal  | [M <sub>x</sub> ]    | 0.13    | Nm                 |
| Torque de reação do mancal  | [M <sub>y</sub> ]    | 0.00    | Nm                 |
| Torque de reação do mancal  | [M <sub>z</sub> ]    | 0.00    | Nm                 |
| Torque de reação do mancal  | [M <sub>r</sub> ]    | 0.13    | Nm (0°)            |
| Nível do óleo   | [H]                  | 0.000   | mm                 |
| Torque de atrito independentemente da carga[M <sub>0</sub> ]                              |                      | 0.587   | Nm                 |
| Torque de atrito dependendo da carga [M <sub>1</sub> ]                                    |                      | 1.931   | Nm                 |
| Torque de atrito rolamento de rolos cilíndricos[M <sub>2</sub> ]                          |                      | 0.000   | Nm                 |
| Torque de atrito vedações conforme especificado no catálogo principal 4000/IV T DE: 1994  |                      |         |                    |
| Torque de fricção   | [M <sub>loss</sub> ] | 2.518   | Nm                 |
| Potência dissipada  | [P <sub>loss</sub> ] | 263.672 | W                  |
| O torque de atrito é calculado em conformidade com as indicações do catálogo SKF de 1994. |                      |         |                    |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>x</sub> ]    | 0.000   | µm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>y</sub> ]    | 10.000  | µm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>z</sub> ]    | -0.000  | µm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>r</sub> ]    | 0.000   | µm                 |
| Inclinação do mancal  | [r <sub>x</sub> ]    | 0.000   | mrاد (0')          |
| Inclinação do mancal  | [r <sub>y</sub> ]    | -1.882  | mrاد (-6.47')      |
| Inclinação do mancal  | [r <sub>z</sub> ]    | -0.000  | mrاد (0')          |
| Inclinação do mancal  | [r <sub>r</sub> ]    | 0.000   | mrاد (0')          |

Dano (%) [Lreq] ( 20000.000)

Condição de carga B1 B2  
1 2.00 67.29

Σ 2.00 67.29

Utilização (%) [Lreq] ( 20000.000)

B1 B2  
30.92 88.80

Indicação: Utilização = (Lreq/Lh)^(1/k)

Rolamento de esferas: k = 3, mancal de rolamento: k = 10/3

B1: RollerBearing3

B2: RollerBearing4

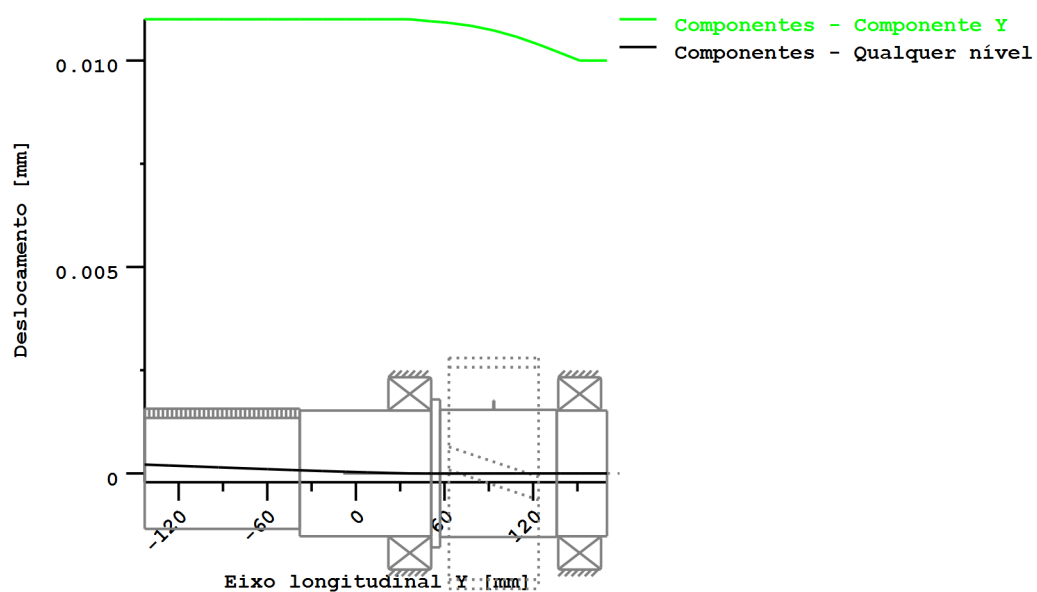
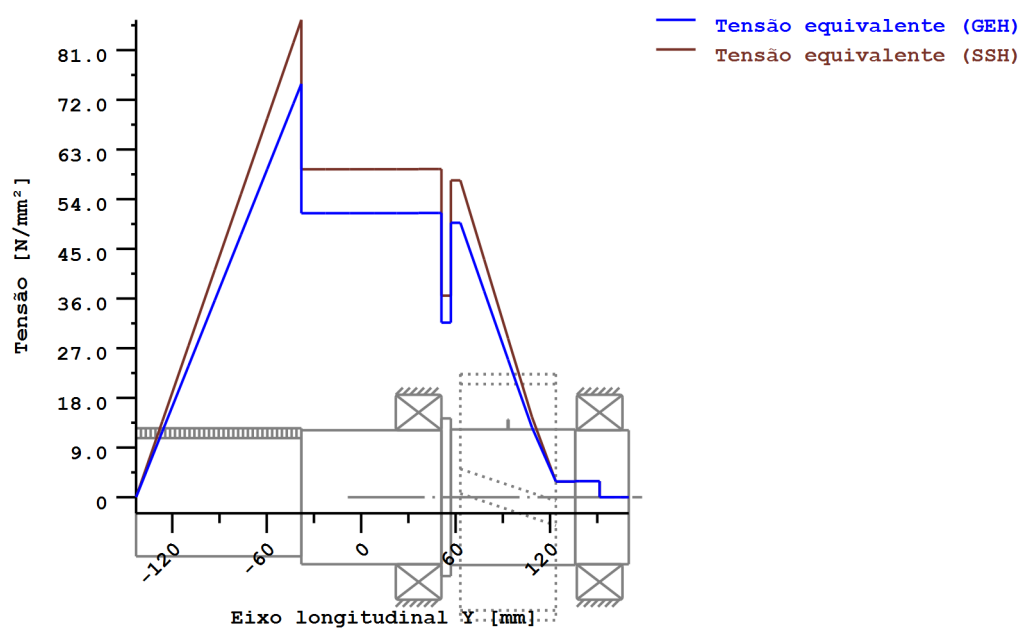


Figura: Deformação (linhas de flexão, etc.) (Qualquer nível 270 121)



Tensões nominais, sem ter em conta as concentrações de tensão  
 GEH(von Mises):  $\sigma_V = ((\sigma_B + \sigma_Z, D)^2 + 3 * (\tau_T + \tau_S)^2)^{1/2}$   
 SSH(Tresca):  $\sigma_V = ((\sigma_B - \sigma_Z, D)^2 + 4 * (\tau_T + \tau_S)^2)^{1/2}$

Figura: Tensão equivalente

**Cálculo da resistência em conformidade com DIN 743:2012  
com fadiga a baixo número de ciclos análoga à diretriz FKM e ao projeto FVA**

**Resumo**

**Veio A**

|                           |                       |
|---------------------------|-----------------------|
| Material                  | 42 CrMo 4 (1)         |
| Tipo de material          | Aço beneficiado       |
| Tratamento do material    | com liga, beneficiado |
| Tratamento de superfícies | Nenhum                |

Cálculo da fadiga a baixo número de ciclos e da resistência estática

Cálculo para caso de esforço 2 ( $\sigma_{av}/\sigma_{mv} = \text{const}$ )

| Seção transversal | Posição (coord Y) (mm) |                              |
|-------------------|------------------------|------------------------------|
| A-A               | 105.00                 | Ressalto do eixo             |
| B-B               | 99.99                  | Chaveta                      |
| C-C               | 194.00                 | Ressalto do eixo com entalhe |
| D-D               | 200.00                 | Ressalto do eixo             |

Resultados:

| Seção transversal | Kfb  | Kfs  | K2d  | SD   | SS   |
|-------------------|------|------|------|------|------|
| A-A               | 2.54 | 0.88 | 0.85 | 4.65 | 5.18 |
| B-B               | 2.86 | 1.00 | 0.85 | 5.07 | 5.44 |
| C-C               | 3.23 | 0.88 | 0.84 | 5.24 | 7.39 |
| D-D               | 2.74 | 0.88 | 0.84 | 6.11 | 7.82 |

|                      |      |      |
|----------------------|------|------|
| Seguranças nominais: | 1.20 | 1.20 |
|----------------------|------|------|

Abreviaturas:

Kfb: Fator de entalhe flexão

Kfs: Fator de superfície

K2d: fator dimensional flexão

SD: Segurança resistência à fadiga

SS: Segurança limite de elasticidade

**Vida útil e dano**

|                                   |        |            |
|-----------------------------------|--------|------------|
| Tempo de vida útil do sistema (h) | [Hatt] | 1000000.00 |
|-----------------------------------|--------|------------|

|                     |     |      |
|---------------------|-----|------|
| Dano do sistema (%) | [D] | 0.00 |
|---------------------|-----|------|

|          |                  |
|----------|------------------|
| Dano (%) | [H] ( 20000.0 h) |
|----------|------------------|

Cálculo da confiabilidade R(t) com distribuição Weibull; t em (h):

$$R(t) = 100 * \exp(-((t^{\text{fac}} - t_0)/(T - t_0))^b) \%$$

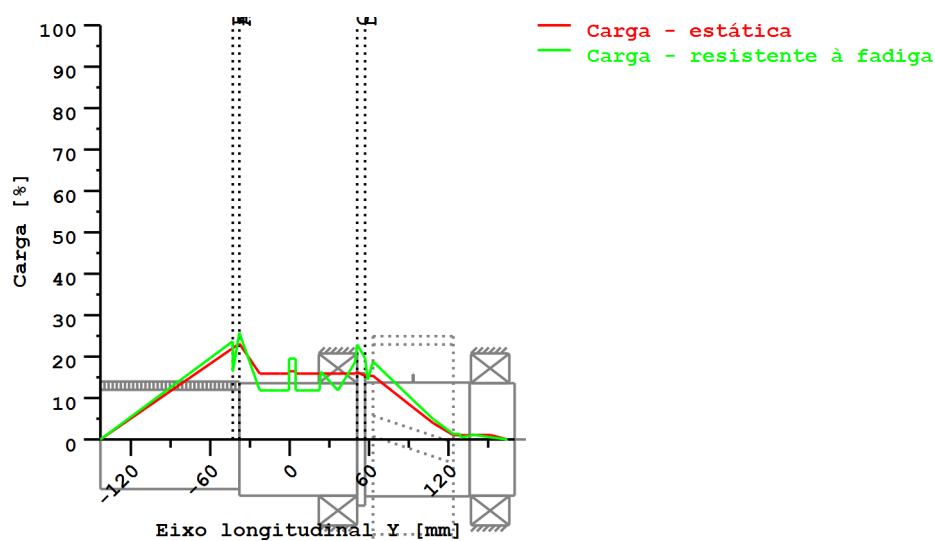
| Welle | fac   | b   | t0         | T         |
|-------|-------|-----|------------|-----------|
| 1     | 60000 | 1.5 | 5.471e+010 | 1.16e+011 |

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| Dano da seção transversal (%) | [D]  |
| A-A:                          | 0.00 |

|      |      |
|------|------|
| B-B: | 0.00 |
| C-C: | 0.00 |
| D-D: | 0.00 |

**Utilização (%) [Smin/S]**

| Seção transversal     | Estática | Resistente à fadiga |
|-----------------------|----------|---------------------|
| A-A                   | 23.144   | 25.791              |
| B-B                   | 22.040   | 23.691              |
| C-C                   | 16.242   | 22.921              |
| D-D                   | 15.352   | 19.647              |
| Utilização máxima (%) | [A]      | 25.791              |



Utilização =  $S_{min}/S$  (%)

Figura: Resistência

### Detalhes de cálculo

#### Indicações gerais

|                    |        |         |
|--------------------|--------|---------|
| Designação         | Veio A |         |
| Desenho            |        |         |
| Comprimento (mm)   | [l]    | 313.00  |
| Velocidade (1/min) | [n]    | 1000.00 |

|                           |                       |
|---------------------------|-----------------------|
| Material                  | 42 CrMo 4 (1)         |
| Tipo de material          | Aço beneficiado       |
| Tratamento do material    | com liga, beneficiado |
| Tratamento de superfícies | Nenhum                |

|                                     | Tração/pressão | Flexão | Torção | Cisalhamento |
|-------------------------------------|----------------|--------|--------|--------------|
| Fator de carga cálculo estático     | 1.700          | 1.700  | 1.700  | 1.700        |
| Fator de carga resistência à fadiga | 1.000          | 1.000  | 1.000  | 1.000        |

Resistência à ruptura de unidade de controle (D= 105.00 mm) (N/mm<sup>2</sup>) [R<sub>m</sub> d= 105.00] 800.00

Limite de elasticidade Unidade de controle (D= 105.00 mm) (N/mm<sup>2</sup>) [R<sub>p</sub> d= 105.00] 550.00

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| [σ <sub>zdW</sub> ] (bei dB) (N/mm <sup>2</sup> ) | 320.00                        |
| [σ <sub>bW</sub> ] (bei dB) (N/mm <sup>2</sup> )  | 400.00                        |
| [τ <sub>tW</sub> ] (bei dB) (N/mm <sup>2</sup> )  | 240.00                        |
| Espessura matéria-prima (mm)                      | [d <sub>Werkst</sub> ] 110.00 |

Dados do material (σ<sub>Beff</sub>, σ<sub>Seff</sub>) em conformidade com as normas do material

Resistência a alternância calculada com K<sub>1</sub>(d), em conformidade com a norma DIN 743/3

Fator geométrico de dimensões K<sub>1</sub>d calculado com diâmetro de eixo D

Valores de resistência de material determinados a partir do diâmetro do eixo

(Requisito: melhoramento do eixo torneado)

Indicação: Os seguintes valores de materiais são válidos só exatamente para a primeira seção transversal; os outros são determinados de acordo com o respectivo "Diâmetro para fator dimensional".



|                  |        |
|------------------|--------|
| [σBeff] (N/mm²)  | 800.00 |
| [σSeff] (N/mm²)  | 550.00 |
| [σbF] (N/mm²)    | 660.00 |
| [τtF] (N/mm²)    | 381.05 |
| [σBRand] (N/mm²) | 708.00 |
|                  |        |
| [σzdW] (N/mm²)   | 320.00 |
| [σbW] (N/mm²)    | 400.00 |
| [τtW] (N/mm²)    | 240.00 |

Fadiga a baixo número de ciclos para solicitação de nível único

|  |        |          |
|--|--------|----------|
| Vida útil nominal  | [H]    | 20000.00 |
| Número de ciclos de carga (Mio)                          | [NL]   | 1200.000 |
| Dados da linha "Wöhler" semelhantes aos da diretiva FKM: |        |          |
| [kσ, kτ]   | 5      | 8        |
| [kDσ, kDτ]   | 0      | 0        |
| [NDσ, NDτ]   | 1e+006 | 1e+006   |
| [NDσII, NDτII]   | 0      | 0        |

Cálculo para caso de esforço 2 ( $\sigma_{av}/\sigma_{mv} = \text{const}$ )

### Seção transversal 'A-A' Ressalto do eixo

|                                      |                  |             |
|--------------------------------------|------------------|-------------|
| Comentário                           | Y= 105.00mm      |             |
| Posição (coordenada Y) (mm)          | [y]              | 105.000     |
| Diâmetro externo (mm)                | [da]             | 75.000      |
| Diâmetro interno (mm)                | [di]             | 0.000       |
| Diâmetro para fator dimensional (mm) | [deff]           | 85.000      |
| Efeito de entalhe                    | Ressalto do eixo |             |
| [D, r, t] (mm)                       | 85.000           | 1.000 5.000 |
| Rugosidade média (μm)                | [Rz]             | 8.000       |

|  | Tração/pressão | Flexão  | Torção  | Cisalhamento |
|--|----------------|---------|---------|--------------|
| Carga: (N) (Nm)                                  |                |         |         |              |
| Valor médio                                      |                |         |         |              |
| [Fzdm, Mbm, Tm, Fqm]                             | 0.4            | 0.0     | 1790.5  | 0.0          |
| Deflexão (amplitude) [Fzda, Mba, Ta, Fqa]        | 0.4            | 1.9     | 1790.5  | 35.6         |
| Valor máximo [Fzdmax, Mbmax, Tmax, Fqmax]        | 1.5            | 3.2     | 6087.7  | 60.6         |
| Seção transversal, torques de resistência: (mm²) |                |         |         |              |
| [A, Wb, Wt, A]                                   | 4417.9         | 41417.5 | 82835.0 | 4417.9       |

|                                      |       |       |        |       |
|--------------------------------------|-------|-------|--------|-------|
| Tensões: (N/mm²)                     |       |       |        |       |
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm²)         | 0.000 | 0.000 | 21.615 | 0.000 |
| [σzda, σba, τa, τqa] (N/mm²)         | 0.000 | 0.045 | 21.615 | 0.011 |
| [σzdmax, σbmax, τmax, τqmax] (N/mm²) | 0.000 | 0.077 | 73.492 | 0.018 |

|                                |          |       |
|--------------------------------|----------|-------|
| Efeito tecnológico de tamanhos | [K1(σB)] | 1.000 |
|                                | [K1(σS)] | 1.000 |

|  | Tração/pressão | Flexão | Torção |
|--|----------------|--------|--------|
| Coeficiente de forma                         | [a]            | 3.121  | 2.862  |
| Quebra de tensão relacionada                 | [G']           | 2.510  | 2.510  |
| Sensibilidade ao entalhe                     | [n]            | 1.125  | 1.125  |
| Coeficiente de efeito de entalhe             | [β]            | 2.774  | 2.544  |
| Efeito geométrico de tamanhos                | [K2(d)]        | 1.000  | 0.846  |
| Fator de influência rugosidade da superfície | [KF]           | 0.880  | 0.880  |
| Fator de endurecimento da superfície         | [KV]           | 1.000  | 1.000  |
| Fator de influência total                    | [K]            | 2.909  | 3.142  |

Nível de segurança disponível para a verificação de resistência permanente:

|                                  |       |        |
|----------------------------------|-------|--------|
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [σmV] | 37.439 |
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [τmV] | 21.615 |

Resistência dos componentes a esforços alternados (N/mm²)

|   |         |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|---------|
| Fator de influência sens. média tensão. | [σWK]   | 109.989 | 127.324 | 112.262 |
|   | [ψσK]   | 0.074   | 0.086   | 0.075   |
| Amplitude tolerável (N/mm²)             | [σADK]  | 0.017   | 0.874   | 104.385 |
| Amplitude tolerável (N/mm²)             | [σANK]  | 0.017   | 0.874   | 104.385 |
| Soma eficaz Miner                       | [DM]    | 0.300   | 0.300   | 0.300   |
| Fator de espectro                       | [fKoll] | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Segurança contra fadiga                 | [S]     |         | 4.653   |         |

|  |          |         |         |         |
|--|----------|---------|---------|---------|
| Segurança nominal contra fadiga  | [Smin]   | 1.200   |         |         |
| Resultado (%)  | [S/Smin] | 387.7   |         |         |
| Nível de segurança disponível<br>para a verificação contra ultrapassagem do limite elástico: |          |         |         |         |
| Sensibilidade ao entalhe estática  | [K2F]    | 1.000   | 1.200   | 1.200   |
| Fator de aumento   | [yF]     | 1.150   | 1.100   | 1.000   |
| Limite de escoamento de componentes (N/mm²)  |          |         |         |         |
|  | [σFK]    | 632.500 | 726.000 | 381.051 |
| Segurança limite elástico  | [S]      |         | 5.185   |         |
| Segurança nominal  | [Smin]   |         | 1.200   |         |
| Resultado (%)  | [S/Smin] |         | 432.1   |         |

### Seção transversal 'B-B' Chaveta

|  |                          |                 |                |         |              |
|--|--------------------------|-----------------|----------------|---------|--------------|
| Comentário                                       | Y=                       | 0.00...100.00mm |                |         |              |
| Posição (coordenada Y) (mm)                      | [y]                      |                 |                | 99.990  |              |
| Diâmetro externo (mm)                            | [da]                     |                 |                | 75.000  |              |
| Diâmetro interno (mm)                            | [di]                     |                 |                | 0.000   |              |
| Diâmetro para fator dimensional (mm)             | [deff]                   |                 |                | 75.000  |              |
| Efeito de entalhe                                |                          |                 | Chaveta        |         |              |
| Quantidade de chavetas                           | [n]                      |                 |                | 1       |              |
| Ranhura usinada com fresa de topo                |                          |                 |                |         |              |
| Norma:   | DIN 6885.1:1968 Standard |                 |                |         |              |
| [b, t] (mm)                                      | 20.000                   | 7.600           |                |         |              |
| Rugosidade média (µm)                            | [Rz]                     |                 |                | 8.000   |              |
|  |                          |                 | Tração/pressão | Flexão  | Torção       |
| Carga: (N) (Nm)                                  |                          |                 |                |         | Cisalhamento |
| Valor médio                                      |                          |                 |                |         |              |
| [Fzdm, Mbm, Tm, Fqm]                             |                          | 0.4             | 0.0            | 1705.1  | 0.0          |
| Deflexão (amplitude) [Fzda, Mba, Ta, Fqa]        |                          | 0.4             | 1.7            | 1705.1  | 33.9         |
| Valor máximo [Fzdmax, Mbmax, Tmax, Fqmax]        |                          | 1.5             | 2.9            | 5797.2  | 57.7         |
| Seção transversal, torques de resistência: (mm²) |                          |                 |                |         |              |
| [A, Wb, Wt, A]                                   |                          | 4417.9          | 41417.5        | 82835.0 | 4417.9       |

|                                      |  |       |       |        |       |
|--------------------------------------|--|-------|-------|--------|-------|
| Tensões: (N/mm²)                     |  |       |       |        |       |
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm²)         |  | 0.000 | 0.000 | 20.584 | 0.000 |
| [σzda, σba, τa, τqa] (N/mm²)         |  | 0.000 | 0.041 | 20.584 | 0.010 |
| [σzdmax, σbmax, τmax, τqmax] (N/mm²) |  | 0.000 | 0.070 | 69.985 | 0.017 |

|                                |          |       |  |  |  |
|--------------------------------|----------|-------|--|--|--|
| Efeito tecnológico de tamanhos | [K1(σB)] | 1.000 |  |  |  |
|                                | [K1(σS)] | 1.000 |  |  |  |

|  |          |       |                |        |        |
|--|----------|-------|----------------|--------|--------|
|  |          |       | Tração/pressão | Flexão | Torção |
| Coeficiente de efeito de entalhe   | [β(dB)]  | 2.800 | 2.800          | 1.700  |        |
| [dB] (mm) = 40.0   |          |       |                |        |        |
| Efeito geométrico de tamanhos  | [K3(d)]  | 0.931 | 0.931          | 0.965  |        |
| Efeito geométrico de tamanhos  | [K3(dB)] | 0.950 | 0.950          | 0.974  |        |
| Coeficiente de efeito de entalhe   | [β]      | 2.856 | 2.856          | 1.717  |        |
| Efeito geométrico de tamanhos  | [K2(d)]  | 1.000 | 0.846          | 0.846  |        |
| Fator de influência rugosidade da superfície   | [KF]     | 1.000 | 1.000          | 1.000  | 1.000  |
| O fator de rugosidade está incluído no coeficiente de efeito de entalhe, em conformidade com a norma |          |       |                |        |        |
| Fator de endurecimento da superfície   | [KV]     | 1.000 | 1.000          | 1.000  |        |
| Fator de influência total  | [K]      | 2.856 | 3.375          | 2.029  |        |

Nível de segurança disponível para a verificação de resistência permanente:

|                                  |       |        |  |  |
|----------------------------------|-------|--------|--|--|
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [σmV] | 35.652 |  |  |
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [τmV] | 20.584 |  |  |

Resistência dos componentes a esforços alternados (N/mm²)

|   |         |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|---------|
|   | [σWK]   | 112.028 | 118.508 | 118.288 |
| Fator de influência sens. média tensão. |         |         |         |         |
|   | [ψσK]   | 0.075   | 0.080   | 0.080   |
| Amplitude tolerável (N/mm²)             | [σADK]  | 0.015   | 0.757   | 109.543 |
| Amplitude tolerável (N/mm²)             | [σANK]  | 0.015   | 0.757   | 109.543 |
| Soma eficaz Miner                       | [DM]    | 0.300   | 0.300   | 0.300   |
| Fator de espectro                       | [fKoll] | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Segurança contra fadiga                 | [S]     |         | 5.065   |         |

|  |          |         |         |         |
|--|----------|---------|---------|---------|
| Segurança nominal contra fadiga  | [Smin]   | 1.200   |         |         |
| Resultado (%)  | [S/Smin] | 422.1   |         |         |
| Nível de segurança disponível<br>para a verificação contra ultrapassagem do limite elástico: |          |         |         |         |
| Sensibilidade ao entalhe estática  | [K2F]    | 1.000   | 1.200   | 1.200   |
| Fator de aumento   | [γF]     | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Limite de escoamento de componentes (N/mm²)  |          |         |         |         |
|  | [σFK]    | 550.000 | 660.000 | 381.051 |
| Segurança limite elástico  | [S]      |         | 5.445   |         |
| Segurança nominal  | [Smin]   |         | 1.200   |         |
| Resultado (%)  | [S/Smin] |         | 453.7   |         |

### Seção transversal 'C-C' Ressalto do eixo com entalhe

|                                      |             |         |                              |        |             |
|--------------------------------------|-------------|---------|------------------------------|--------|-------------|
| Comentário                           | Y= 194.00mm |         |                              |        |             |
| Posição (coordenada Y) (mm)          | [y]         |         | 194.000                      |        |             |
| Diâmetro externo (mm)                | [da]        |         | 85.000                       |        |             |
| Diâmetro interno (mm)                | [di]        |         | 0.000                        |        |             |
| Diâmetro para fator dimensional (mm) | [deff]      |         | 100.000                      |        |             |
| Efeito de entalhe                    |             |         | Ressalto do eixo com entalhe |        |             |
| [D, d, D1, r, t1] (mm)               |             | 100.000 | 84.400                       | 85.000 | 0.600       |
| Forma B                              |             |         |                              |        | Qu[2].Geo.t |
| Rugosidade média (μm)                | [Rz]        |         |                              | 8.000  |             |

|  |                      |         | Tração/pressão | Flexão   | Torção | Cisalhamento |
|--|----------------------|---------|----------------|----------|--------|--------------|
| Carga: (N) (Nm)                                  |                      |         |                |          |        |              |
| Valor médio                                      |                      |         |                |          |        |              |
|  | [Fzdm, Mbm, Tm, Fqm] | -2074.0 | 0.0            | 1790.5   | 0.0    |              |
| Deflexão (amplitude)                             | [Fzda, Mba, Ta, Fqa] | 2074.0  | 6.6            | 1790.5   | 125.1  |              |
| Valor máximo [Fzdmax, Mbmax, Tmax, Fqmax]        |                      | -7051.5 | 11.2           | 6087.7   | 212.7  |              |
| Seção transversal, torques de resistência: (mm²) |                      |         |                |          |        |              |
| [A, Wb, Wt, A]                                   |                      | 5594.7  | 59023.8        | 118047.6 | 5594.7 |              |

|                              |  |        |       |        |       |
|------------------------------|--|--------|-------|--------|-------|
| Tensões: (N/mm²)             |  |        |       |        |       |
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm²) |  | -0.371 | 0.000 | 15.168 | 0.000 |
| [σzda, σba, τa, τqa] (N/mm²) |  | 0.371  | 0.111 | 15.168 | 0.030 |
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm²) |  | -1.260 | 0.189 | 51.570 | 0.051 |

|                                |          |       |  |  |  |
|--------------------------------|----------|-------|--|--|--|
| Efeito tecnológico de tamanhos | [K1(σB)] | 1.000 |  |  |  |
|                                | [K1(σS)] | 1.000 |  |  |  |

|  |         |       | Tração/pressão | Flexão | Torção |
|--|---------|-------|----------------|--------|--------|
| Coeficiente de forma                         | [a]     | 4.180 | 3.746          | 2.355  |        |
| Quebra de tensão relacionada                 | [G']    | 4.067 | 4.067          | 1.917  |        |
| Sensibilidade ao entalhe                     | [n]     | 1.159 | 1.159          | 1.109  |        |
| Coeficiente de efeito de entalhe             | [β]     | 3.606 | 3.232          | 2.123  |        |
| Efeito geométrico de tamanhos                | [K2(d)] | 1.000 | 0.838          | 0.838  |        |
| Fator de influência rugosidade da superfície | [KF]    | 0.880 | 0.880          | 0.931  |        |
| Fator de endurecimento da superfície         | [KV]    | 1.000 | 1.000          | 1.000  |        |
| Fator de influência total                    | [K]     | 3.742 | 3.992          | 2.608  |        |

Nível de segurança disponível para a verificação de resistência permanente:

|                                  |       |        |  |  |
|----------------------------------|-------|--------|--|--|
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [σmV] | 26.268 |  |  |
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [τmV] | 15.166 |  |  |

Resistência dos componentes a esforços alternados (N/mm²)

|   |          |        |         |        |  |
|---|----------|--------|---------|--------|--|
|   | [σWK]    | 85.523 | 100.189 | 92.035 |  |
| Fator de influência sens. média tensão. |          |        |         |        |  |
|   | [ψσK]    | 0.056  | 0.067   | 0.061  |  |
| Amplitude tolerável (N/mm²)             | [σADK]   | 8.802  | 3.201   | 86.742 |  |
| Amplitude tolerável (N/mm²)             | [σANK]   | 8.802  | 3.201   | 86.742 |  |
| Soma eficaz Miner                       | [DM]     | 0.300  | 0.300   | 0.300  |  |
| Fator de espectro                       | [fKoll]  | 1.000  | 1.000   | 1.000  |  |
| Segurança contra fadiga                 | [S]      |        | 5.235   |        |  |
| Segurança nominal contra fadiga         | [Smin]   |        | 1.200   |        |  |
| Resultado (%)                           | [S/Smin] |        | 436.3   |        |  |

Nível de segurança disponível

para a verificação contra ultrapassagem do limite elástico:

|  |          |         |         |         |
|--|----------|---------|---------|---------|
| Sensibilidade ao entalhe estática                        | [K2F]    | 1.000   | 1.200   | 1.200   |
| Fator de aumento   | [yF]     | 1.150   | 1.150   | 1.000   |
| Limite de escoamento de componentes (N/mm <sup>2</sup> ) |          |         |         |         |
|  | [σFK]    | 632.500 | 759.000 | 381.051 |
| Segurança limite elástico                                | [S]      |         | 7.388   |         |
| Segurança nominal  | [Smin]   |         | 1.200   |         |
| Resultado (%)  | [S/Smin] |         | 615.7   |         |

#### Seção transversal 'D-D' Ressalto do eixo

Comentário Y= 200.00mm

|                                      |        |         |         |                  |
|--------------------------------------|--------|---------|---------|------------------|
| Posição (coordenada Y) (mm)          | [y]    |         | 200.000 |                  |
| Diâmetro externo (mm)                | [da]   |         | 86.000  |                  |
| Diâmetro interno (mm)                | [di]   |         | 0.000   |                  |
| Diâmetro para fator dimensional (mm) | [deff] |         | 100.000 |                  |
| Efeito de entalhe                    |        |         |         | Ressalto do eixo |
| [D, r, t] (mm)                       |        | 100.000 | 1.000   | 7.000            |
| Rugosidade média (μm)                | [Rz]   |         |         | 8.000            |

|   |                      | Tração/pressão | Flexão  | Torção   | Cisalhamento |
|---|----------------------|----------------|---------|----------|--------------|
| Carga: (N) (Nm)   |                      |                |         |          |              |
| Valor médio   |                      |                |         |          |              |
|   | [Fzdm, Mbm, Tm, Fqm] | -2074.0        | 0.0     | 1790.5   | 0.0          |
| Deflexão (amplitude)  | [Fzda, Mba, Ta, Fqa] | 2074.0         | 5.8     | 1790.5   | 121.5        |
| Valor máximo [Fzdmax, Mbmax, Tmax, Fqmax]                     |                      | -7051.5        | 9.9     | 6087.7   | 206.5        |
| Seção transversal, torques de resistência: (mm <sup>2</sup> ) |                      |                |         |          |              |
| [A, Wb, Wt, A]  |                      | 5808.8         | 62444.7 | 124889.3 | 5808.8       |

|   |  |        |       |        |       |
|---|--|--------|-------|--------|-------|
| Tensões: (N/mm <sup>2</sup> )                     |  |        |       |        |       |
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm <sup>2</sup> )         |  | -0.357 | 0.000 | 14.337 | 0.000 |
| [σzda, σba, τa, τqa] (N/mm <sup>2</sup> )         |  | 0.357  | 0.093 | 14.337 | 0.028 |
| [σzdmax, σbmax, τmax, τqmax] (N/mm <sup>2</sup> ) |  | -1.214 | 0.159 | 48.745 | 0.047 |

|                                |          |       |  |  |  |
|--------------------------------|----------|-------|--|--|--|
| Efeito tecnológico de tamanhos | [K1(σB)] | 1.000 |  |  |  |
|                                | [K1(σS)] | 1.000 |  |  |  |

|  |         | Tração/pressão | Flexão | Torção |  |
|--|---------|----------------|--------|--------|--|
| Coefficiente de forma                        | [a]     | 3.399          | 3.084  | 2.017  |  |
| Quebra de tensão relacionada                 | [G']    | 2.483          | 2.483  | 1.150  |  |
| Sensibilidade ao entalhe                     | [n]     | 1.124          | 1.124  | 1.085  |  |
| Coefficiente de efeito de entalhe            | [β]     | 3.023          | 2.742  | 1.860  |  |
| Efeito geométrico de tamanhos                | [K2(d)] | 1.000          | 0.837  | 0.837  |  |
| Fator de influência rugosidade da superfície | [KF]    | 0.880          | 0.880  | 0.931  |  |
| Fator de endurecimento da superfície         | [KV]    | 1.000          | 1.000  | 1.000  |  |
| Fator de influência total                    | [K]     | 3.158          | 3.412  | 2.296  |  |

Nível de segurança disponível para a verificação de resistência permanente:

|   |       |        |  |  |  |
|---|-------|--------|--|--|--|
| Tensão média equivalente (N/mm <sup>2</sup> ) | [σmV] | 24.829 |  |  |  |
| Tensão média equivalente (N/mm <sup>2</sup> ) | [τmV] | 14.335 |  |  |  |

Resistência dos componentes a esforços alternados (N/mm<sup>2</sup>)

|  |          |         |         |         |  |
|--|----------|---------|---------|---------|--|
|  | [σWK]    | 101.316 | 117.238 | 104.545 |  |
| Fator de influência sens. média tensão.  |          |         |         |         |  |
|  | [ψσK]    | 0.068   | 0.079   | 0.070   |  |
| Amplitude tolerável (N/mm <sup>2</sup> ) | [σADK]   | 8.966   | 2.842   | 97.715  |  |
| Amplitude tolerável (N/mm <sup>2</sup> ) | [σANK]   | 8.966   | 2.842   | 97.715  |  |
| Soma eficaz Miner                        | [DM]     | 0.300   | 0.300   | 0.300   |  |
| Fator de espectro                        | [fKoll]  | 1.000   | 1.000   | 1.000   |  |
| Segurança contra fadiga                  | [S]      |         | 6.108   |         |  |
| Segurança nominal contra fadiga          | [Smin]   |         | 1.200   |         |  |
| Resultado (%)                            | [S/Smin] |         | 509.0   |         |  |

Nível de segurança disponível

para a verificação contra ultrapassagem do limite elástico:

|  |       |         |         |         |
|--|-------|---------|---------|---------|
| Sensibilidade ao entalhe estática                        | [K2F] | 1.000   | 1.200   | 1.200   |
| Fator de aumento   | [yF]  | 1.150   | 1.150   | 1.000   |
| Limite de escoamento de componentes (N/mm <sup>2</sup> ) |       |         |         |         |
|  | [σFK] | 632.500 | 759.000 | 381.051 |

|                           |          |       |
|---------------------------|----------|-------|
| Segurança limite elástico | [S]      | 7.817 |
| Segurança nominal         | [Smin]   | 1.200 |
| Resultado (%)             | [S/Smin] | 651.4 |

Indicações:

- A força transversal não é tida em conta no cálculo em conformidade com a norma DIN 743.
- Seção transversal com conexão por interferência: Os fatores de chanfro para o caso "conexão por interferência leve" já não estão definidas na norma DIN 743.

Os fatores são adotados da diretiva FKM; exceto se os fatores para "conexão por interferência fixa" em conformidade com a norma DIN forem menores, esses serão usados.

---

|                  |         |     |
|------------------|---------|-----|
| Fim do Relatório | linhas: | 777 |
|------------------|---------|-----|

---

## Veio A - cálculo da chaveta

KISSsoft Release 03/2017 F

KISSsoft University license - Universidade do Porto

Arquivo

Nome : Mauro Filipe Rodrigues Domingues  
Modificado por: up201404793 Data: Junho de 2019 Hora: -

### Chaveta [acoplamento exterior]

Método de cálculo: DIN 6892-B:2012

| Designação  | DIN 6885.1:1968 Standard |           |
|---|--------------------------|-----------|
| Largura de chaveta (mm)                                     | [b]                      | 20.00     |
| Altura de chaveta (mm)                                      | [h]                      | 12.00     |
| Chanfro (valor médio) (mm)                                  | [r]                      | 0.70      |
| Diâmetro do eixo (mm)                                       | [d]                      | 75.00     |
| Torque nominal (Nm)   | [T]                      | 3580.99   |
| Fator de aplicação  | [KA]                     | 1.60      |
| Torque equivalente (Nm)                                     | [Teq]                    | 5729.58   |
| Torque máximo (Nm)  | [Tmax]                   | 5729.58   |
| Torque friccional mínimo com conexão por interferência (Nm) | [TRmin]                  | 0.00      |
| Curva de torque: Com torque alternado                       |                          |           |
| Torque máximo de regresso (Nm)                              | [TmaxR]                  | 3580.99   |
| Frequência de mudança de pico de carga                      | [NL]                     | 10000     |
| Frequência de mudança de sentido de carga                   | [NW]                     | 1000      |
| Fator de mudança de sentido de carga                        | [fw]                     | 1.00      |
| Quantidade de chavetas                                      | [i]                      | 1         |
| Fator de carga  | [phi]                    | 1.00      |
| Força tangencial equivalente (N)                            | [Feq]                    | 152788.75 |
| Força tangencial máxima (N)                                 | [Fmax]                   | 152788.75 |
| Porcentagem suportante para compressão superficial equi.    | [Kneq]                   | 1.00      |
| Porcentagem suportante para compressão superficial máxima   | [Knmax]                  | 1.00      |
| Fator auxiliar  | [Kle]                    | 1.242     |
| Fator de distribuição de carga                              | [KI]                     | 1.242     |
| Fator de atrito   | [KReq]                   | 1.000     |
| Fator de atrito   | [KR]                     | 1.000     |

### Eixo

|                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| Material (Entrada própria) | 42 CrMo 4 (1)         |
| Tipo                       | Aço beneficiado       |
| Tratamento                 | com liga, beneficiado |

|  |         |        |
|--|---------|--------|
| Resistência à ruptura (N/mm <sup>2</sup> )             | [Rm]    | 800.00 |
| Limite de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )            | [Re]    | 550.00 |
| Profundidade da ranhura do eixo (valor mínimo) (mm)    | [t1]    | 7.50   |
| Chanfro no eixo (mm)                                   | [s1]    | 0.01   |
| Comprimento de apoio de chaveta (mm)                   | [ltr]   | 100.00 |
| Altura de chaveta de apoio (mm)                        | [t1tr]  | 5.43   |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                | [peq]   | 349.42 |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                | [pmax]  | 349.42 |
| Fator de suporte                                       | [fs]    | 1.30   |
| Fator de influência de endurecimento                   | [fH]    | 1.00   |
| Compressão superficial admissível (N/mm <sup>2</sup> ) | [pzul]  | 715.00 |
| Fator de frequência de picos de carga                  | [fL]    | 1.40   |
| Fator de mudança de sentido de carga                   | [fw]    | 1.00   |
| Segurança contra fluência (fw * pzul peq)              | [SFeq]  | 2.05   |
| Segurança contra fluência (fL * pzul/pmax)             | [SFmax] | 2.86   |
| Segurança mínima                                       | [SF]    | 2.05   |

### **Cubo**

|  |                       |                     |
|--|-----------------------|---------------------|
| Material   | C45 (1)               |                     |
| Tipo   | Aço beneficiado       |                     |
| Tratamento   | sem liga, beneficiado |                     |
| Resistência à ruptura (N/mm <sup>2</sup> )             | [Rm]                  | 700.00 (d= 0- 16mm) |
| Limite de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )            | [Re]                  | 490.00 (d= 0- 16mm) |
| Profundidade de ranhura de cubo (valor mínimo) (mm)    | [t2]                  | 4.90                |
| Chanfro no cubo (mm)                                   | [s2]                  | 0.01                |
| Comprimento de apoio de chaveta (mm)                   | [ltr]                 | 100.00              |
| Altura de chaveta de apoio (mm)                        | [t2tr]                | 5.15                |
| Pequeno diâmetro externo de cubo (mm)                  | [D1]                  | 100.00              |
| Grande diâmetro externo de cubo (mm)                   | [D2]                  | 100.00              |
| Largura da peça do cubo com D2 (mm)                    | [c]                   | 100.00              |
| Diâmetro de substituição cubo (mm)                     | [D]                   | 100.00              |
| Distância a0 (Fig. 2, DIN 6892) (mm)                   | [a0]                  | 50.00               |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                | [peq]                 | 368.32              |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                | [pmax]                | 368.32              |
| Fator de suporte                                       | [fs]                  | 1.50                |
| Fator de influência de endurecimento                   | [fH]                  | 1.00                |
| Compressão superficial admissível (N/mm <sup>2</sup> ) | [pzul]                | 735.00              |
| Fator de frequência de picos de carga                  | [fL]                  | 1.40                |
| Fator de mudança de sentido de carga                   | [fw]                  | 1.00                |
| Segurança contra fluência (fw * pzul peq)              | [SFeq]                | 2.00                |
| Segurança contra fluência (fL * pzul/pmax)             | [SFmax]               | 2.79                |
| Segurança mínima                                       | [SF]                  | 2.00                |

### **Chaveta**

|   |                       |                     |
|---|-----------------------|---------------------|
| Material                                    | C60                   |                     |
| Tipo  | Aço beneficiado       |                     |
| Tratamento                                  | sem liga, beneficiado |                     |
| Resistência à ruptura (N/mm <sup>2</sup> )  | [Rm]                  | 850.00 (d= 0- 16mm) |
| Limite de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> ) | [Re]                  | 580.00 (d= 0- 16mm) |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )     | [peq]                 | 349.42 / 368.32     |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )     | [pmax]                | 349.42 / 368.32     |

|  |         |        |
|--|---------|--------|
| Fator de suporte                                       | [fs]    | 1.10   |
| Fator de influência de endurecimento                   | [fH]    | 1.00   |
| Compressão superficial admissível (N/mm <sup>2</sup> ) | [pzul]  | 638.00 |
| Fator de frequência de picos de carga                  | [fL]    | 1.40   |
| Fator de mudança de sentido de carga                   | [fw]    | 1.00   |
| Segurança contra fluência (fw * pzul/peq)              | [SFeq]  | 1.73   |
| Segurança contra fluência (fL * pzul/pmax)             | [SFmax] | 2.43   |
| Segurança mínima                                       | [SF]    | 1.73   |

|  |         |         |
|--|---------|---------|
| Superfície de seção transversal (mm <sup>2</sup> ) | [b*ltr] | 2000.00 |
| Esforço de cisalhamento (N/mm <sup>2</sup> )       | [tau]   | 76.39   |

#### Observações:

Segurança = Mínimo (fw\*pzul/peq, fL\*pzul/pmax)

Condição em conformidade com a norma DIN 6892 Segurança >= 1,0

Chanfro na chaveta Valor médio em conformidade com os exemplos da norma DIN 6892

Profundidade da ranhura: Valor mínimo em conformidade com os exemplos da norma DIN 6892

---

|                  |         |     |
|------------------|---------|-----|
| Fim do Relatório | linhas: | 133 |
|------------------|---------|-----|

---

### **Chaveta      [acoplamento da engrenagem z1]**

Método de cálculo:      DIN 6892-B:2012

|   |                          |           |
|---|--------------------------|-----------|
| Designação  | DIN 6885.1:1968 Standard |           |
| Largura de chaveta (mm)                                     | [b]                      | 25.00     |
| Altura de chaveta (mm)                                      | [h]                      | 14.00     |
| Chanfro (valor médio) (mm)                                  | [r]                      | 0.70      |
|   |                          |           |
| Diâmetro do eixo (mm)                                       | [d]                      | 86.00     |
|   |                          |           |
| Torque nominal (Nm)   | [T]                      | 3580.99   |
| Fator de aplicação  | [KA]                     | 1.60      |
| Torque equivalente (Nm)                                     | [Teq]                    | 5729.58   |
| Torque máximo (Nm)  | [Tmax]                   | 5729.58   |
| Torque friccional mínimo com conexão por interferência (Nm) |                          |           |
| [TRmin]   | 0.00                     |           |
| Curva de torque: Com torque alternado                       |                          |           |
| Torque máximo de regresso (Nm)                              | [TmaxR]                  | 3580.99   |
| Frequência de mudança de pico de carga                      | [NL]                     | 10000     |
| Frequência de mudança de sentido de carga                   | [NW]                     | 1000      |
| Fator de mudança de sentido de carga                        | [fw]                     | 1.00      |
|   |                          |           |
| Quantidade de chavetas                                      | [i]                      | 1         |
| Fator de carga  | [phi]                    | 1.00      |
|   |                          |           |
| Força tangencialequivalente (N)                             | [Feq]                    | 133246.00 |
| Força tangencial máxima (N)                                 | [Fmax]                   | 133246.00 |
| Porcentagem suportante para compressão superficial equi.    |                          |           |
|   | [Kneq]                   | 1.00      |
| Porcentagem suportante para compressão superficial máxima   |                          |           |



|                                |         |       |
|--------------------------------|---------|-------|
|                                | [Knmax] | 1.00  |
| Fator auxiliar                 | [Kle]   | 1.103 |
| Fator de distribuição de carga | [KI]    | 1.103 |
| Fator de atrito                | [KReq]  | 1.000 |
| Fator de atrito                | [KR]    | 1.000 |

### **Eixo**

|  |                       |        |
|--|-----------------------|--------|
| Material (Entrada própria)                             | 42 CrMo 4 (1)         |        |
| Tipo   | Aço beneficiado       |        |
| Tratamento   | com liga, beneficiado |        |
| Resistência à ruptura (N/mm <sup>2</sup> )             | [Rm]                  | 800.00 |
| Limite de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )            | [Re]                  | 550.00 |
| Profundidade da ranhura do eixo (valor mínimo) (mm)    | [t1]                  | 9.00   |
| Chanfro no eixo (mm)                                   | [s1]                  | 0.01   |
| Comprimento de apoio de chaveta (mm)                   | [ltr]                 | 70.00  |
| Altura de chaveta de apoio (mm)                        | [t1tr]                | 6.43   |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                | [peq]                 | 326.67 |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                | [pmax]                | 326.67 |
| Fator de suporte                                       | [fs]                  | 1.30   |
| Fator de influência de endurecimento                   | [fH]                  | 1.00   |
| Compressão superficial admissível (N/mm <sup>2</sup> ) | [pzul]                | 715.00 |
| Fator de frequência de picos de carga                  | [fL]                  | 1.40   |
| Fator de mudança de sentido de carga                   | [fw]                  | 1.00   |
| Segurança contra fluência (fw * pzul peq)              | [SFeq]                | 2.19   |
| Segurança contra fluência (fL * pzul/pmax)             | [SFmax]               | 3.06   |
| Segurança mínima                                       | [SF]                  | 2.19   |

### **Cubo**

|  |                           |         |
|--|---------------------------|---------|
| Material (Entrada própria)                             | 18CrNiMo7-6               |         |
| Tipo   | Aço de cementação         |         |
| Tratamento   | endurecido por cementação |         |
| Resistência à ruptura (N/mm <sup>2</sup> )             | [Rm]                      | 871.00  |
| Limite de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )            | [Re]                      | 617.00  |
| Profundidade de ranhura de cubo (valor mínimo) (mm)    | [t2]                      | 5.40    |
| Chanfro no cubo (mm)                                   | [s2]                      | 0.01    |
| Comprimento de apoio de chaveta (mm)                   | [ltr]                     | 70.00   |
| Altura de chaveta de apoio (mm)                        | [t2tr]                    | 6.15    |
| Pequeno diâmetro externo de cubo (mm)                  | [D1]                      | 150.00  |
| Grande diâmetro externo de cubo (mm)                   | [D2]                      | 150.00  |
| Largura da peça do cubo com D2 (mm)                    | [c]                       | 60.70   |
| Diâmetro de substituição cubo (mm)                     | [D]                       | 150.00  |
| Distância a0 (Fig. 2, DIN 6892) (mm)                   | [a0]                      | 35.00   |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                | [peq]                     | 341.55  |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                | [pmax]                    | 341.55  |
| Fator de suporte                                       | [fs]                      | 1.50    |
| Fator de influência de endurecimento                   | [fH]                      | 1.15    |
| Compressão superficial admissível (N/mm <sup>2</sup> ) | [pzul]                    | 1064.32 |
| Fator de frequência de picos de carga                  | [fL]                      | 1.40    |
| Fator de mudança de sentido de carga                   | [fw]                      | 1.00    |

|   |                      |      |
|---|----------------------|------|
| Segurança contra fluência ( $f_w \cdot p_{zul} / p_{eq}$ )  | [SF <sub>eq</sub> ]  | 3.12 |
| Segurança contra fluência ( $f_L \cdot p_{zul} / p_{max}$ ) | [SF <sub>max</sub> ] | 4.36 |
| Segurança mínima  | [SF]                 | 3.12 |

### **Chaveta**

|   |                       |                     |
|---|-----------------------|---------------------|
| Material  | C60                   |                     |
| Tipo  | Aço beneficiado       |                     |
| Tratamento  | sem liga, beneficiado |                     |
| Resistência à ruptura (N/mm <sup>2</sup> )                  | [R <sub>m</sub> ]     | 850.00 (d= 0- 16mm) |
| Limite de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )                 | [R <sub>e</sub> ]     | 580.00 (d= 0- 16mm) |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                     | [p <sub>eq</sub> ]    | 326.67 / 341.55     |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                     | [p <sub>max</sub> ]   | 326.67 / 341.55     |
| Fator de suporte  | [f <sub>s</sub> ]     | 1.10                |
| Fator de influência de endurecimento                        | [f <sub>H</sub> ]     | 1.00                |
| Compressão superficial admissível (N/mm <sup>2</sup> )      | [p <sub>zul</sub> ]   | 638.00              |
| Fator de frequência de picos de carga                       | [f <sub>L</sub> ]     | 1.40                |
| Fator de mudança de sentido de carga                        | [f <sub>w</sub> ]     | 1.00                |
| Segurança contra fluência ( $f_w \cdot p_{zul} / p_{eq}$ )  | [SF <sub>eq</sub> ]   | 1.87                |
| Segurança contra fluência ( $f_L \cdot p_{zul} / p_{max}$ ) | [SF <sub>max</sub> ]  | 2.62                |
| Segurança mínima  | [SF]                  | 1.87                |
| Superfície de seção transversal (mm <sup>2</sup> )          | [b*l <sub>tr</sub> ]  | 1750.00             |
| Esforço de cisalhamento (N/mm <sup>2</sup> )                | [tau]                 | 76.14               |

### **Observações:**

Segurança = Mínimo ( $f_w \cdot p_{zul} / p_{eq}$ ,  $f_L \cdot p_{zul} / p_{max}$ )

Condição em conformidade com a norma DIN 6892 Segurança  $\geq 1,0$

Chanfro na chaveta Valor médio em conformidade com os exemplos da norma DIN 6892

Profundidade da ranhura: Valor mínimo em conformidade com os exemplos da norma DIN 6892

---

Fim do Relatório

linhas: 133

---

## Veio B (Veio intermédio)

KISSsoft Release 03/2017 F

KISSsoft University license - Universidade do Porto

### Arquivo

Nome : Mauro Filipe Rodrigues Domingues

Modificado por: up201404793

Data: Junho de 2019

Hora: -

## Cálculo de veios, eixos e suportes

### Dados de entrada

Sistema de coordenadas de eixo: ver Fig. W-002

|   |             |
|---|-------------|
| Designação  | Shaft1      |
| Desenho   |             |
| Posição de partida (mm)   | 0.000       |
| Comprimento (mm)  | 414.100     |
| Velocidade (1/min)  | 225.56      |
| Sentido de rotação: contrário ao dos ponteiros do relógio             |             |
| Material (Entrada própria)  | 18CrNiMo7-6 |
| Módulo de elasticidade (N/mm²)  | 206000.000  |
| Número de Poisson nu  | 0.300       |
| Densidade (kg/m³)   | 7830.000    |
| Coeficiente de dilatação térmica (10 <sup>-6</sup> /K)                | 11.500      |
| Temperatura (°C)  | 20.000      |
| Peso do eixo (kg)   | 51.178      |
| (Observação: Peso válido para o eixo sem ter em conta as engrenagens) |             |
| Peso do eixo, incluindo massas adicionais (kg)                        | 228.657     |
| Momento de inércia de massa (kg*m²)                                   | 10.855      |
| Momento de inércia GD2 (Nm²)  | 425.945     |
| Peso no sentido ( 0.000, 0.000, -1.000)                               |             |
| Engrenagens consideradas como massas                                  |             |
| Deformações por cisalhamento são tidas em conta                       |             |
| Fator de correção de cisalhamento                                     | 1.100       |
| O ângulo de pressão de mancais de rolamento é tido em conta           |             |
| Zona de tolerância: Valor médio                                       |             |
| Temperatura de referência (°C)  | 20.000      |

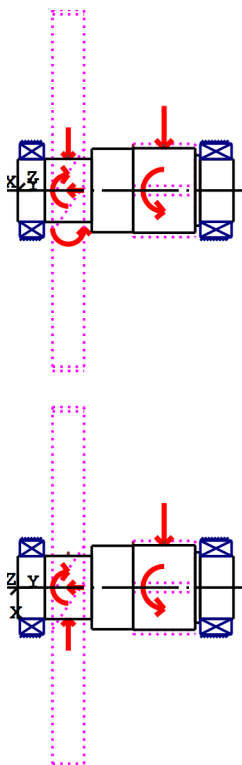


Figura: Aplicações da carga

#### Definição do eixo (veio B)

##### Contorno externo

Cilindro (cilent) 0.000mm ... 52.000mm

|                  |      |          |
|------------------|------|----------|
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 120.0000 |
| Comprimento (mm) | [l]  | 52.0000  |
| Rugosidade (μm)  | [Rz] | 8.0000   |

Chanfro esquerda (Chanfro esquerda)

l=2.00 (mm), alpha=45.00 (°)

Raio direita (Raio direita)

r=0.50 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2μm/125μin)

Cilindro (cil1) 52.000mm ... 142.000mm

|                  |      |          |
|------------------|------|----------|
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 121.0000 |
| Comprimento (mm) | [l]  | 90.0000  |
| Rugosidade (μm)  | [Rz] | 8.0000   |

Raio direita (Raio direita)

r=1.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2μm/125μin)

Ranhura da chaveta (Ranhura da chaveta)

60.000mm ... 140.000mm

l=80.00 (mm), i=1, Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2μm/125μin)

Cilindro (cil2) 142.000mm ... 221.500mm

|                  |      |          |
|------------------|------|----------|
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 160.0000 |
| Comprimento (mm) | [l]  | 79.5000  |
| Rugosidade (µm)  | [Rz] | 8.0000   |

Raio direita (Radius right)

r=1.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

|                  |      |                         |
|------------------|------|-------------------------|
| Cilindro (cil3)  |      | 221.500mm ... 340.600mm |
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 162.0000                |
| Comprimento (mm) | [l]  | 119.1000                |
| Rugosidade (µm)  | [Rz] | 8.0000                  |

|                  |      |                         |
|------------------|------|-------------------------|
| Cilindro (cil4 ) |      | 340.600mm ... 350.100mm |
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 135.0000                |
| Comprimento (mm) | [l]  | 9.5000                  |
| Rugosidade (µm)  | [Rz] | 8.0000                  |

Raio esquerda (Radius left)

r=1.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

|                  |      |                         |
|------------------|------|-------------------------|
| Cilindro (cil5)  |      | 350.100mm ... 414.100mm |
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 120.0000                |
| Comprimento (mm) | [l]  | 64.0000                 |
| Rugosidade (µm)  | [Rz] | 8.0000                  |

Entalhe esquerda (Entalhe esquerda)

r=1.00 (mm), t=0.40 (mm), l=6.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

Entrada própria, Forma B, FKM

Chanfro direita (Chanfro direita)

l=2.00 (mm), alpha=45.00 (°)

## Forças

| Tipo do elemento de força                         | Engrenagem cilíndrica       |
|---|-----------------------------|
| Designação no modelo                              | z2                          |
| Posição no eixo (mm)                              | [y]local 97.0000            |
| Posição no sistema global (mm)                    | [y]global 97.0000           |
| Diâmetro primitivo de funcionamento (mm)          | 691.9264                    |
| Ângulo oblíquo (°)                                | 15.0721 esquerda            |
| Ângulo de pressão                                 | 20.7234                     |
| Ângulo de pressão de operação na seção normal (°) | 0.0000                      |
| Posição do contato (°)                            | 60.7000                     |
| Comprimento da aplicação da força (mm)            | 187.5000 acionado (entrada) |
| Potência (kW)                                     | -7937.8528                  |
| Torque (Nm)                                       | -6178.8496                  |
| Força axial (N)                                   | -8989.8797                  |
| Força transversal X (N)                           | 22944.2118                  |
| Força transversal Z (N)                           | 0.0000                      |
| Momento fletor X (Nm)                             | -2137.6545                  |
| Momento fletor Z (Nm)                             |                             |

Tipo do elemento de força

Engrenagem cilíndrica

|  |           |   |
|--|-----------|---|
| Designação no modelo   |           | z3  |
| Posição no eixo (mm)   | [ylocal]  | 281.0000                                  |
| Posição no sistema global (mm)                                     | [yglobal] | 281.0000                                  |
| Diâmetro primitivo de funcionamento (mm)                           |           | 178.9358                                  |
| Ângulo oblíquo (°)   |           | 25.1594 Helicoidal dupla esquerda-direita |
| Ângulo de pressãoÂngulo de pressão de operação na seção normal (°) |           | 20.9130                                   |
| Posição do contato (°)   |           | 0.0000                                    |
| Comprimento da aplicação da força (mm)                             |           | 119.1000                                  |
| Potência (kW)  |           | 187.5000 acionante (saída)                |
| Torque (Nm)  |           | 7937.8528                                 |
| Força axial (N)  |           | 0.0000                                    |
| Força transversal X (N)  |           | -37456.6761                               |
| Força transversal Z (N)  |           | -88722.9227                               |
| Momento fletor X (Nm)  |           | 0.0000                                    |
| Momento fletor Z (Nm)  |           | 0.0000                                    |

#### Mancal

|                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| Designação no modelo | Rol 3                        |
| Tipo de mancal       | Koyo 23024RH                 |
| Design do mancal     | Rolamento de rolos oscilante |

|   |                       |             |
|---|-----------------------|-------------|
| Posição do mancal (mm)                      | [ylocal]              | 27.000      |
| Posição do mancal (mm)                      | [yglobal]             | 27.000      |
| Fixação do anel externo                     |                       | Mancal fixo |
| Diâmetro interno (mm)                       | [d]                   | 120.000     |
| Diâmetro externo (mm)                       | [D]                   | 180.000     |
| Largura (mm)                                | [b]                   | 46.000      |
| Raio de canto (mm)                          | [r]                   | 2.000       |
| Classificação da carga estática (kN)        | [C <sub>0</sub> ]     | 524.000     |
| Classificação da carga dinâmica básica (kN) |                       |             |
|   | [C]                   | 394.000     |
| Classificação de carga fadiga (kN)          | [C <sub>u</sub> ]     | 51.600      |
| Valores para a geometria aproximada:        |                       |             |
| Classificação da carga dinâmica básica (kN) |                       |             |
|   | [C <sub>theo</sub> ]  | 0.000       |
| Classificação da carga estática (kN)        | [C <sub>0theo</sub> ] | 0.000       |

|                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| Designação no modelo | Rol 4                        |
| Tipo de mancal       | Koyo 24024RH                 |
| Design do mancal     | Rolamento de rolos oscilante |

|   |                   |             |
|---|-------------------|-------------|
| Posição do mancal (mm)                      | [ylocal]          | 380.500     |
| Posição do mancal (mm)                      | [yglobal]         | 380.500     |
| Fixação do anel externo                     |                   | Mancal fixo |
| Diâmetro interno (mm)                       | [d]               | 120.000     |
| Diâmetro externo (mm)                       | [D]               | 180.000     |
| Largura (mm)                                | [b]               | 60.000      |
| Raio de canto (mm)                          | [r]               | 2.000       |
| Classificação da carga estática (kN)        | [C <sub>0</sub> ] | 709.000     |
| Classificação da carga dinâmica básica (kN) |                   |             |
|   | [C]               | 484.000     |
| Classificação de carga fadiga (kN)          | [C <sub>u</sub> ] | 61.800      |
| Valores para a geometria aproximada:        |                   |             |
| Classificação da carga dinâmica básica (kN) |                   |             |

|                                      |                       |       |
|--------------------------------------|-----------------------|-------|
| Classificação da carga estática (kN) | [C <sub>theo</sub> ]  | 0.000 |
|                                      | [C <sub>0theo</sub> ] | 0.000 |

-----

Eixo 'Shaft1': A massa do seguinte elemento é tida em conta (y= 97.0000 (mm)): Engrenagem cilíndrica 'z1(GearPair\_const1)'  
m (yS= 97.0000 (mm)): 173.2494 (kg)  
Jp: 10.6852 (kg\*m<sup>2</sup>), Jxx: 5.3958 (kg\*m<sup>2</sup>), Jzz: 5.3958 (kg\*m<sup>2</sup>)

-----

Eixo 'Shaft1': A massa do seguinte elemento é tida em conta (y= 221.4750 (mm)): Engrenagem cilíndrica 'z2(GearPair\_const3)'  
m (yS= 221.4750 (mm)): 0.0020 (kg)  
Jp: 0.0000 (kg\*m<sup>2</sup>), Jxx: 0.0000 (kg\*m<sup>2</sup>), Jzz: 0.0000 (kg\*m<sup>2</sup>)

-----

Eixo 'Shaft1': A massa do seguinte elemento é tida em conta (y= 281.0250 (mm)): Engrenagem cilíndrica 'z2(GearPair\_const3)'  
m (yS= 281.0250 (mm)): 4.2273 (kg)  
Jp: 0.0308 (kg\*m<sup>2</sup>), Jxx: 0.0204 (kg\*m<sup>2</sup>), Jzz: 0.0204 (kg\*m<sup>2</sup>)

## **Resultados**

### **Eixo**

|                         |           |
|-------------------------|-----------|
| Deflexão máxima (µm)    | 56.700    |
| Posição do máximo (mm)  | 251.262   |
| Centro de massa (mm)    | 217.203   |
| Soma da carga axial (N) | -6178.850 |
| Torção sob torque (°)   | 0.024     |

### **Mancal**

|  |                        |       |    |
|--|------------------------|-------|----|
| Probabilidade de falha   | [n]                    | 10.00 | %  |
| Folga axial  | [u <sub>A</sub> ]      | 10.00 | µm |
| Lubrificante   | Entrada própria        |       |    |
| Lubrificante com aditivos, cujo efeito foi avaliado em mancais de rolamento.       |                        |       |    |
| Lubrificação de óleo sem filtragem o com filtro de fluxo paralelo, ISO4406 -/19/16 |                        |       |    |
| Lubrificante - Temperatura de funcionamento  | [T <sub>B</sub> ]      | 60.00 | °C |
| Valor-limite para fator aISO   | [a <sub>ISOmax</sub> ] | 50.00 |    |
| Nível do óleo  | [h <sub>oil</sub> ]    | 0.00  | mm |
| Lubrificação por imersão em óleo   |                        |       |    |

Mancal de rolamento clássico (considerar ângulo de pressão)

### **Eixo 'veio B' Mancal de rolamento 'Rol 3'**

|                                   |                   |       |    |
|-----------------------------------|-------------------|-------|----|
| Posição (coordenada Y)            | [y]               | 27.00 | mm |
| carga dinamicamente equivalente   | [P]               | 38.55 | kN |
| Carga equivalente                 | [P <sub>0</sub> ] | 38.28 | kN |
| Fator para probabilidade de falha | [a <sub>1</sub> ] | 1.000 |    |

|   |                      |           |                    |
|---|----------------------|-----------|--------------------|
| Fator modificador de vida   | [a <sub>ISO</sub> ]  | 0.557     |                    |
| Vida útil nominal rolamento   | [L <sub>nh</sub> ]   | 171148.61 | h                  |
| Vida útil modificada rolamento  | [L <sub>nmh</sub> ]  | 95286.62  | h                  |
| Viscosidade operacional   | [v]                  | 62.57     | mm <sup>2</sup> /s |
| Fator de segurança estático   | [S <sub>0</sub> ]    | 13.69     |                    |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>x</sub> ]    | 23.795    | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>y</sub> ]    | 4.540     | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>z</sub> ]    | 8.175     | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>r</sub> ]    | 25.160    | kN (18.96°)        |
| Torque de reação do mancal  | [M <sub>x</sub> ]    | -0.00     | Nm                 |
| Torque de reação do mancal  | [M <sub>y</sub> ]    | 0.00      | Nm                 |
| Torque de reação do mancal  | [M <sub>z</sub> ]    | -0.00     | Nm                 |
| Torque de reação do mancal  | [M <sub>r</sub> ]    | 0.00      | Nm (-160.2°)       |
| Nível do óleo   | [H]                  | 0.000     | mm                 |
| Torque de atrito independentemente da carga[M <sub>0</sub> ]                              |                      | 0.887     | Nm                 |
| Torque de atrito dependendo da carga [M <sub>1</sub> ]                                    |                      | 0.680     | Nm                 |
| Torque de atrito rolamento de rolos cilíndricos[M <sub>2</sub> ]                          |                      | 0.000     | Nm                 |
| Torque de atrito vedações conforme especificado no catálogo principal 4000/IV T DE: 1994  |                      |           |                    |
| Torque de fricção   | [M <sub>loss</sub> ] | 1.567     | Nm                 |
| Potência dissipada  | [P <sub>loss</sub> ] | 37.003    | W                  |
| O torque de atrito é calculado em conformidade com as indicações do catálogo SKF de 1994. |                      |           |                    |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>x</sub> ]    | -46.690   | µm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>y</sub> ]    | -10.000   | µm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>z</sub> ]    | -14.020   | µm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>r</sub> ]    | 48.750    | µm (-163.29°)      |
| Inclinação do mancal  | [r <sub>x</sub> ]    | -0.160    | mrاد (-0.55')      |
| Inclinação do mancal  | [r <sub>y</sub> ]    | -0.000    | mrاد (0')          |
| Inclinação do mancal  | [r <sub>z</sub> ]    | -0.059    | mrاد (-0.2')       |
| Inclinação do mancal  | [r <sub>r</sub> ]    | 0.171     | mrاد (0.59')       |

#### Eixo 'veio B' Mancal de rolamento 'Rol 4'

|   |                      |          |                    |
|---|----------------------|----------|--------------------|
| Posição (coordenada Y)  | [y]                  | 380.50   | mm                 |
| carga dinamicamente equivalente   | [P]                  | 67.63    | kN                 |
| Carga equivalente   | [P <sub>0</sub> ]    | 67.55    | kN                 |
| Fator para probabilidade de falha   | [a <sub>1</sub> ]    | 1.000    |                    |
| Fator modificador de vida   | [a <sub>ISO</sub> ]  | 0.428    |                    |
| Vida útil nominal rolamento   | [L <sub>nh</sub> ]   | 52199.04 | h                  |
| Vida útil modificada rolamento  | [L <sub>nmh</sub> ]  | 22331.24 | h                  |
| Viscosidade operacional   | [v]                  | 62.57    | mm <sup>2</sup> /s |
| Fator de segurança estático   | [S <sub>0</sub> ]    | 10.50    |                    |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>x</sub> ]    | 22.643   | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>y</sub> ]    | 1.636    | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>z</sub> ]    | 59.837   | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>r</sub> ]    | 63.978   | kN (69.27°)        |
| Nível do óleo   | [H]                  | 0.000    | mm                 |
| Torque de atrito independentemente da carga[M <sub>0</sub> ]                              |                      | 1.281    | Nm                 |
| Torque de atrito dependendo da carga [M <sub>1</sub> ]                                    |                      | 3.106    | Nm                 |
| Torque de atrito rolamento de rolos cilíndricos[M <sub>2</sub> ]                          |                      | 0.000    | Nm                 |
| Torque de atrito vedações conforme especificado no catálogo principal 4000/IV T DE: 1994  |                      |          |                    |
| Torque de fricção   | [M <sub>loss</sub> ] | 4.387    | Nm                 |
| Potência dissipada  | [P <sub>loss</sub> ] | 103.634  | W                  |
| O torque de atrito é calculado em conformidade com as indicações do catálogo SKF de 1994. |                      |          |                    |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>x</sub> ]    | -16.525  | µm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>y</sub> ]    | -10.000  | µm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>z</sub> ]    | -45.864  | µm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>r</sub> ]    | 48.750   | µm (-109.81°)      |



|                      |         |        |               |
|----------------------|---------|--------|---------------|
| Inclinação do mancal | $[r_x]$ | 0.002  | mrاد (0.01')  |
| Inclinação do mancal | $[r_y]$ | 0.426  | mrاد (1.47')  |
| Inclinação do mancal | $[r_z]$ | -0.124 | mrاد (-0.43') |
| Inclinação do mancal | $[r_l]$ | 0.124  | mrاد (0.43')  |

Dano (%) [Lreq] ( 20000.000)

| Condição de carga | B1    | B2    |
|-------------------|-------|-------|
| 1                 | 20.99 | 89.56 |

Σ 20.99 89.56

Utilização (%) [Lreq] ( 20000.000)

| B1    | B2    |
|-------|-------|
| 62.60 | 96.75 |

Indicação: Utilização =  $(Lreq/Lh)^{(1/k)}$

Rolamento de esferas:  $k = 3$ , mancal de rolamento:  $k = 10/3$

B1: Rol 3

B2: Rol 4

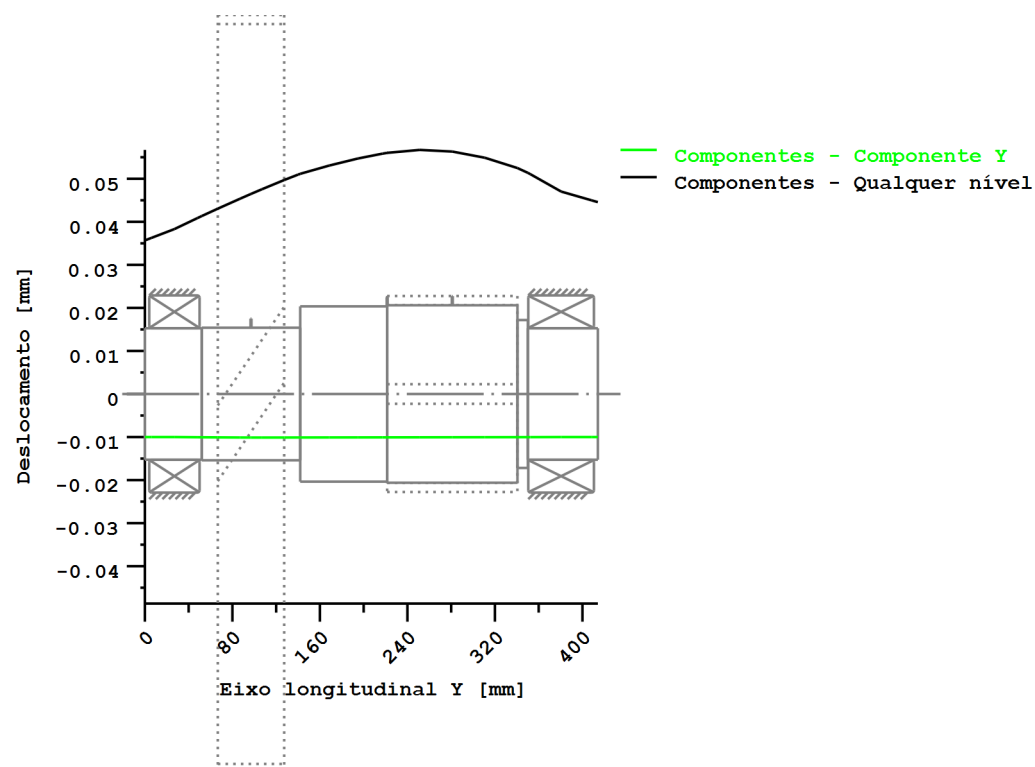
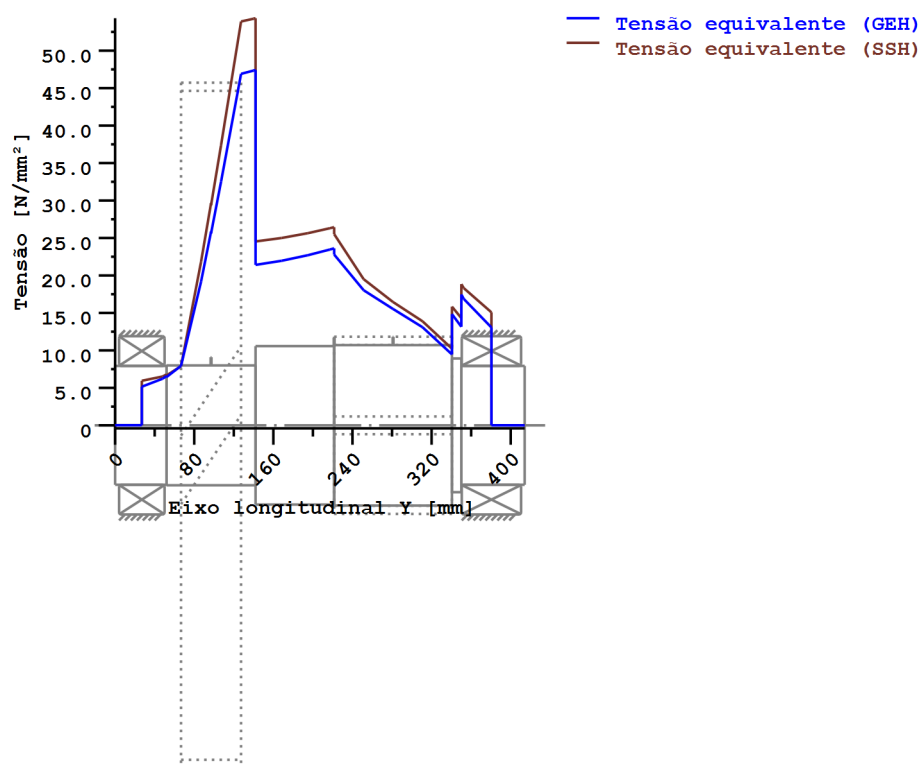


Figura: Deformação (linhas de flexão, etc.) (Qualquer nível 234.9160825 121)



Tensões nominais, sem ter em conta as concentrações de tensão

GEH(von Mises):  $\sigma_V = ((\sigma_B + \sigma_Z, D)^2 + 3 \cdot (\tau_T + \tau_S)^2)^{1/2}$

SSH(Tresca):  $\sigma_V = ((\sigma_B - \sigma_Z, D)^2 + 4 \cdot (\tau_T + \tau_S)^2)^{1/2}$

Figura: Tensão equivalente

**Cálculo da resistência em conformidade com DIN 743:2012  
com fadiga a baixo número de ciclos análoga à diretriz FKM e ao projeto FVA**

**Resumo**

**Veio B**

|                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| Material                  | 18CrNiMo7-6               |
| Tipo de material          | Aço de cementação         |
| Tratamento do material    | endurecido por cementação |
| Tratamento de superfícies | Nenhum                    |

Cálculo da fadiga a baixo número de ciclos e da resistência estática

Cálculo para caso de esforço 2 ( $\sigma_{av}/\sigma_{mv} = \text{const}$ )

| Seção transversal | Posição (coord Y) (mm) |                  |
|-------------------|------------------------|------------------|
| A-A               | 142.00                 | Ressalto do eixo |
| B-B               | 139.99                 | Chaveta          |
| C-C               | 140.01                 | Eixo liso        |

Resultados:

| Seção transversal | Kfb  | Kfs  | K2d  | SD   | SS   | SA    |
|-------------------|------|------|------|------|------|-------|
| A-A               | 2.87 | 0.87 | 0.81 | 5.56 | 8.84 | 16.98 |
| B-B               | 2.98 | 1.00 | 0.81 | 5.93 | 8.86 | 22.52 |
| C-C               | 1.00 | 0.87 | 0.81 | 9.64 | 8.86 | 47.00 |

Seguranças nominais: 1.20 1.20 1.20

Abreviaturas:

Kfb: Fator de entalhe flexão

Kfs: Fator de superfície

K2d: fator dimensional flexão

SD: Segurança resistência à fadiga

SS: Segurança limite de elasticidade

SA: Segurança fissura

**Vida útil e dano**

Tempo de vida útil do sistema (h) [Hatt] 1000000.00

Dano do sistema (%) [D] 0.00

Dano (%) [H] ( 20000.0 h)

Cálculo da confiabilidade R(t) com distribuição Weibull; t em (h):

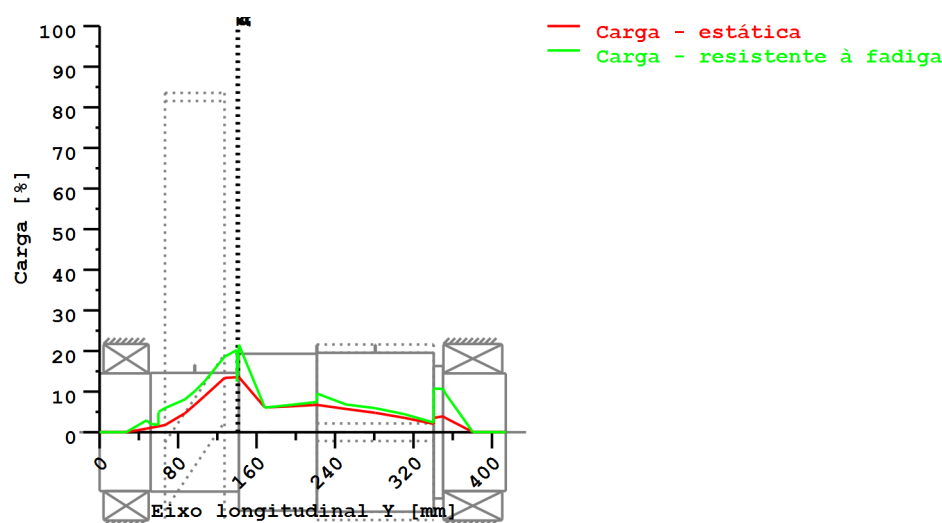
$$R(t) = 100 * \exp(-((t^{\text{fac}} - t_0)/(T - t_0))^b) \%$$

| Welle | fac   | b   | t0         | T          |
|-------|-------|-----|------------|------------|
| 1     | 13534 | 1.5 | 1.234e+010 | 2.617e+010 |

Dano da seção transversal (%) [D]  
A-A: 0.00  
B-B: 0.00  
C-C: 0.00

**Utilização (%) [Smin/S]**

| Seção transversal     | Estática | Resistente à fadiga |
|-----------------------|----------|---------------------|
| A-A                   | 13.569   | 21.572              |
| B-B                   | 13.538   | 20.253              |
| C-C                   | 13.538   | 12.453              |
| Utilização máxima (%) | [A]      | 21.572              |



Utilização =  $S_{min}/S$  (%)

Figura: Resistência

## Detalhes de cálculo

### Indicações gerais

|                    |        |  |        |
|--------------------|--------|--|--------|
| Designação         | Veio B |  |        |
| Desenho            |        |  |        |
| Comprimento (mm)   | [l]    |  | 414.10 |
| Velocidade (1/min) | [n]    |  | 225.56 |

|                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| Material                  | 18CrNiMo7-6               |
| Tipo de material          | Aço de cementação         |
| Tratamento do material    | endurecido por cementação |
| Tratamento de superfícies | Nenhum                    |

|                                     | Tração/pressão | Flexão | Torção | Cisalhamento |
|-------------------------------------|----------------|--------|--------|--------------|
| Fator de carga cálculo estático     | 1.700          | 1.700  | 1.700  | 1.700        |
| Fator de carga resistência à fadiga | 1.000          | 1.000  | 1.000  | 1.000        |

Resistência à ruptura de unidade de controle (D= 170.00 mm) (N/mm<sup>2</sup>) [Rm d= 170.00] 871.00

Limite de elasticidade Unidade de controle (D= 170.00 mm) (N/mm<sup>2</sup>) [Rp d= 170.00] 617.00

|   |                  |
|---|------------------|
| [σ <sub>zdW</sub> ] (bei dB) (N/mm <sup>2</sup> ) | 348.00           |
| [σ <sub>bW</sub> ] (bei dB) (N/mm <sup>2</sup> )  | 435.00           |
| [τ <sub>tW</sub> ] (bei dB) (N/mm <sup>2</sup> )  | 261.00           |
| Espessura matéria-prima (mm)                      | [dWerkst] 170.00 |

Dados do material (σ<sub>Beff</sub>, σ<sub>Seff</sub>) em conformidade com as normas do material

Resistência a alternância calculada com K1(d), em conformidade com a norma DIN 743/3

Fator geométrico de dimensões K1d calculado com diâmetro de eixo D

Valores de resistência de material determinados a partir do diâmetro do eixo

(Requisito: melhoramento do eixo torneado)

Indicação: Os seguintes valores de materiais são válidos só exatamente para a primeira seção transversal; os outros são determinados de acordo com o respectivo "Diâmetro para fator dimensional".

|                  |         |
|------------------|---------|
| [σBeff] (N/mm²)  | 871.00  |
| [σSeff] (N/mm²)  | 617.00  |
| [σbF] (N/mm²)    | 617.00  |
| [τtF] (N/mm²)    | 356.23  |
| [σBRand] (N/mm²) | 2300.00 |

|                |        |
|----------------|--------|
| [σzdW] (N/mm²) | 348.00 |
| [σbW] (N/mm²)  | 435.00 |
| [τtW] (N/mm²)  | 261.00 |

|   |               |
|---|---------------|
| Fadiga a baixo número de ciclos para solicitação de nível único |               |
| Vida útil nominal [H]   | 20000.00      |
| Número de ciclos de carga [NL]                                  | 270.677       |
| Dados da linha "Wöhler" semelhantes aos da diretiva FKM:        |               |
| [kσ, kτ]  | 15 25         |
| [kDσ, kDτ]  | 0 0           |
| [NDσ, NDτ]  | 1e+006 1e+006 |
| [NDσII, NDτII]  | 0 0           |

Cálculo para caso de esforço 2 ( $\sigma_{av}/\sigma_{mv} = \text{const}$ )

### Seção transversal 'A-A' Ressalto do eixo

|                                      |               |         |                  |
|--------------------------------------|---------------|---------|------------------|
| Comentário                           | Y= 142.00mm   |         |                  |
| Posição (coordenada Y) (mm)          | [y]           | 142.000 |                  |
| Diâmetro externo (mm)                | [da]          | 121.000 |                  |
| Diâmetro interno (mm)                | [di]          | 0.000   |                  |
| Diâmetro para fator dimensional (mm) | [deff]        | 160.000 |                  |
| Efeito de entalhe                    |               |         | Ressalto do eixo |
| [D, r, t] (mm)                       | 160.000 1.000 | 19.500  |                  |
| Rugosidade média (μm)                | [Rz]          | 8.000   |                  |

|  | Tração/pressão | Flexão   | Torção   | Cisalhamento |
|--|----------------|----------|----------|--------------|
| Carga: (N) (Nm)                                  |                |          |          |              |
| Valor médio                                      |                |          |          |              |
| [Fzdm, Mbm, Tm, Fqm]                             | 818.2          | 0.0      | 3968.9   | 0.0          |
| Deflexão (amplitude) [Fzda, Mba, Ta, Fqa]        | 818.2          | 1896.2   | 3968.9   | 32836.4      |
| Valor máximo [Fzdmax, Mbmax, Tmax, Fqmax]        | 2782.0         | 3223.6   | 13494.3  | 55821.8      |
| Seção transversal, torques de resistência: (mm²) |                |          |          |              |
| [A, Wb, Wt, A]                                   | 11499.0        | 173922.6 | 347845.2 | 11499.0      |

|                                      |       |        |        |       |
|--------------------------------------|-------|--------|--------|-------|
| Tensões: (N/mm²)                     |       |        |        |       |
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm²)         | 0.071 | 0.000  | 11.410 | 0.000 |
| [σzda, σba, τa, τqa] (N/mm²)         | 0.071 | 10.903 | 11.410 | 3.807 |
| [σzdmax, σbmax, τmax, τqmax] (N/mm²) | 0.242 | 18.535 | 38.794 | 6.473 |

|                                |          |       |
|--------------------------------|----------|-------|
| Efeito tecnológico de tamanhos | [K1(σB)] | 1.000 |
|                                | [K1(σS)] | 1.000 |

|  | Tração/pressão | Flexão | Torção |
|--|----------------|--------|--------|
| Coeficiente de forma                         | [a]            | 4.305  | 3.764  |
| Quebra de tensão relacionada                 | [G']           | 2.417  | 2.417  |
| Sensibilidade ao entalhe                     | [n]            | 1.310  | 1.310  |
| Coeficiente de efeito de entalhe             | [β]            | 3.285  | 2.873  |
| Efeito geométrico de tamanhos                | [K2(d)]        | 1.000  | 0.814  |
| Fator de influência rugosidade da superfície | [KF]           | 0.873  | 0.873  |
| Fator de endurecimento da superfície         | [KV]           | 1.000  | 1.000  |
| Fator de influência total                    | [K]            | 3.431  | 3.673  |

Nível de segurança disponível para a verificação de resistência permanente:

|                                  |       |        |
|----------------------------------|-------|--------|
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [σmV] | 19.763 |
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [τmV] | 11.410 |

Resistência dos componentes a esforços alternados (N/mm²)

|   |         |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|---------|
|   | [σWK]   | 101.433 | 118.419 | 103.588 |
| Fator de influência sens. média tensão. |         |         |         |         |
|   | [ψσK]   | 0.062   | 0.073   | 0.063   |
| Amplitude tolerável (N/mm²)             | [σADK]  | 2.214   | 104.591 | 97.428  |
| Amplitude tolerável (N/mm²)             | [σANK]  | 2.214   | 104.591 | 97.428  |
| Soma eficaz Miner                       | [DM]    | 0.300   | 0.300   | 0.300   |
| Fator de espectro                       | [fKoll] | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Segurança contra fadiga                 | [S]     |         | 5.563   |         |

|                                 |          |       |  |  |
|---------------------------------|----------|-------|--|--|
| Segurança nominal contra fadiga | [Smin]   | 1.200 |  |  |
| Resultado (%)                   | [S/Smin] | 463.6 |  |  |

Nível de segurança disponível

para a verificação contra ultrapassagem do limite elástico:

|   |          |         |         |         |
|---|----------|---------|---------|---------|
| Sensibilidade ao entalhe estática           | [K2F]    | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Fator de aumento                            | [γF]     | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Limite de escoamento de componentes (N/mm²) |          |         |         |         |
|   | [σFK]    | 617.000 | 617.000 | 356.225 |
| Segurança limite elástico                   | [S]      |         | 8.844   |         |
| Segurança nominal                           | [Smin]   |         | 1.200   |         |
| Resultado (%)                               | [S/Smin] |         | 737.0   |         |

Nível de segurança disponível

para a verificação da prevenção de fissuras em camadas superficiais duras:

|                   |          |        |  |  |
|-------------------|----------|--------|--|--|
| Segurança fissura | [S]      | 16.976 |  |  |
| Segurança nominal | [Smin]   | 1.200  |  |  |
| Resultado (%)     | [S/Smin] | 1414.7 |  |  |

### Seção transversal 'B-B' Chaveta

Comentário Y= 60.00...140.00mm

|                                      |                          |         |  |  |
|--------------------------------------|--------------------------|---------|--|--|
| Posição (coordenada Y) (mm)          | [y]                      | 139.990 |  |  |
| Diâmetro externo (mm)                | [da]                     | 121.000 |  |  |
| Diâmetro interno (mm)                | [di]                     | 0.000   |  |  |
| Diâmetro para fator dimensional (mm) | [deff]                   | 121.000 |  |  |
| Efeito de entalhe                    |                          | Chaveta |  |  |
| Quantidade de chavetas               | [n]                      | 1       |  |  |
| Ranhura usinada com fresa de topo    |                          |         |  |  |
| Norma:                               | DIN 6885.1:1968 Standard |         |  |  |
| [b, t] (mm)                          | 32.000 11.100            |         |  |  |
| Rugosidade média (μm)                | [Rz]                     | 8.000   |  |  |

|  |  | Tração/pressão | Flexão   | Torção   | Cisalhamento |
|--|--|----------------|----------|----------|--------------|
| Carga: (N) (Nm)                                  |  |                |          |          |              |
| Valor médio                                      |  |                |          |          |              |
| [Fzdm, Mbm, Tm, Fqm]                             |  | 818.2          | 0.0      | 3968.9   | 0.0          |
| Deflexão (amplitude) [Fzda, Mba, Ta, Fqa]        |  | 818.2          | 1834.7   | 3968.9   | 32837.9      |
| Valor máximo [Fzdmax, Mbmax, Tmax, Fqmax]        |  | 2782.0         | 3119.0   | 13494.3  | 55824.5      |
| Seção transversal, torques de resistência: (mm²) |  |                |          |          |              |
| [A, Wb, Wt, A]                                   |  | 11499.0        | 173922.6 | 347845.2 | 11499.0      |

|                                      |  |       |        |        |       |
|--------------------------------------|--|-------|--------|--------|-------|
| Tensões: (N/mm²)                     |  |       |        |        |       |
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm²)         |  | 0.071 | 0.000  | 11.410 | 0.000 |
| [σzda, σba, τa, τqa] (N/mm²)         |  | 0.071 | 10.549 | 11.410 | 3.808 |
| [σzdmax, σbmax, τmax, τqmax] (N/mm²) |  | 0.242 | 17.934 | 38.794 | 6.473 |

|                                |          |       |  |  |  |
|--------------------------------|----------|-------|--|--|--|
| Efeito tecnológico de tamanhos | [K1(σB)] | 1.000 |  |  |  |
|                                | [K1(σS)] | 1.000 |  |  |  |

|  |          | Tração/pressão | Flexão | Torção |  |
|--|----------|----------------|--------|--------|--|
| Coefficiente de efeito de entalhe  | [β(dB)]  | 2.871          | 2.871  | 1.771  |  |
| [dB] (mm) = 40.0   |          |                |        |        |  |
| Efeito geométrico de tamanhos  | [K3(d)]  | 0.915          | 0.915  | 0.954  |  |
| Efeito geométrico de tamanhos  | [K3(dB)] | 0.949          | 0.949  | 0.972  |  |
| Coefficiente de efeito de entalhe  | [β]      | 2.977          | 2.977  | 1.805  |  |
| Efeito geométrico de tamanhos  | [K2(d)]  | 1.000          | 0.814  | 0.814  |  |
| Fator de influência rugosidade da superfície   | [KF]     | 1.000          | 1.000  | 1.000  |  |
| O fator de rugosidade está incluído no coeficiente de efeito de entalhe, em conformidade com a norma |          |                |        |        |  |
| Fator de endurecimento da superfície   | [KV]     | 1.000          | 1.000  | 1.000  |  |
| Fator de influência total  | [K]      | 2.977          | 3.656  | 2.217  |  |

Nível de segurança disponível para a verificação de resistência permanente:

|                                  |       |        |  |  |  |
|----------------------------------|-------|--------|--|--|--|
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [σmV] | 19.763 |  |  |  |
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [τmV] | 11.410 |  |  |  |

Resistência dos componentes a esforços alternados (N/mm²)

|   |       |         |         |         |  |
|---|-------|---------|---------|---------|--|
|   | [σWK] | 116.888 | 118.984 | 117.749 |  |
| Fator de influência sens. média tensão. |       |         |         |         |  |
|   | [ψσK] | 0.072   | 0.073   | 0.072   |  |

|                                 |          |       |         |         |
|---------------------------------|----------|-------|---------|---------|
| Amplitude tolerável (N/mm²)     | [σADK]   | 2.214 | 104.616 | 109.790 |
| Amplitude tolerável (N/mm²)     | [σANK]   | 2.214 | 104.616 | 109.790 |
| Soma eficaz Miner               | [DM]     | 0.300 | 0.300   | 0.300   |
| Fator de espectro               | [fKoll]  | 1.000 | 1.000   | 1.000   |
| Segurança contra fadiga         | [S]      |       | 5.925   |         |
| Segurança nominal contra fadiga | [Smin]   |       | 1.200   |         |
| Resultado (%)                   | [S/Smin] |       | 493.8   |         |

Nível de segurança disponível

para a verificação contra ultrapassagem do limite elástico:

|   |          |         |         |         |
|---|----------|---------|---------|---------|
| Sensibilidade ao entalhe estática           | [K2F]    | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Fator de aumento                            | [yF]     | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Limite de escoamento de componentes (N/mm²) |          |         |         |         |
|   | [σFK]    | 617.000 | 617.000 | 356.225 |
| Segurança limite elástico                   | [S]      |         | 8.864   |         |
| Segurança nominal                           | [Smin]   |         | 1.200   |         |
| Resultado (%)                               | [S/Smin] |         | 738.7   |         |

Nível de segurança disponível

para a verificação da prevenção de fissuras em camadas superficiais duras:

|                   |          |  |        |  |
|-------------------|----------|--|--------|--|
| Segurança fissura | [S]      |  | 22.521 |  |
| Segurança nominal | [Smin]   |  | 1.200  |  |
| Resultado (%)     | [S/Smin] |  | 1876.8 |  |

### Seção transversal 'C-C' Eixo liso

Comentário

|                                      |        |           |         |  |
|--------------------------------------|--------|-----------|---------|--|
| Posição (coordenada Y) (mm)          | [y]    |           | 140.010 |  |
| Diâmetro externo (mm)                | [da]   |           | 121.000 |  |
| Diâmetro interno (mm)                | [di]   |           | 0.000   |  |
| Diâmetro para fator dimensional (mm) | [deff] |           | 121.000 |  |
| Efeito de entalhe                    |        | Eixo liso |         |  |
| Rugosidade média (µm)                | [Rz]   |           | 8.000   |  |

Carga: (N) (Nm)

Valor médio

|  |                      |         |          |          |         |
|--|----------------------|---------|----------|----------|---------|
|  | [Fzdm, Mbm, Tm, Fqm] | 818.2   | 0.0      | 3968.9   | 0.0     |
| Deflexão (amplitude)                             | [Fzda, Mba, Ta, Fqa] | 818.2   | 1835.3   | 3968.9   | 32837.9 |
| Valor máximo [Fzdmax, Mbmax, Tmax, Fqmax]        |                      | 2782.0  | 3120.1   | 13494.3  | 55824.5 |
| Seção transversal, torques de resistência: (mm²) |                      |         |          |          |         |
| [A, Wb, Wt, A]                                   |                      | 11499.0 | 173922.6 | 347845.2 | 11499.0 |

Tensões: (N/mm²)

|                                      |       |        |        |       |
|--------------------------------------|-------|--------|--------|-------|
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm²)         | 0.071 | 0.000  | 11.410 | 0.000 |
| [σzda, σba, ta, tqa] (N/mm²)         | 0.071 | 10.553 | 11.410 | 3.808 |
| [σzdmax, σbmax, τmax, τqmax] (N/mm²) | 0.242 | 17.939 | 38.794 | 6.473 |

Efeito tecnológico de tamanhos

|          |       |
|----------|-------|
| [K1(σB)] | 1.000 |
| [K1(σS)] | 1.000 |

Tração/pressão Flexão Torção

|  |         |       |       |       |
|--|---------|-------|-------|-------|
| Coeficiente de efeito de entalhe             | [β]     | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| Efeito geométrico de tamanhos                | [K2(d)] | 1.000 | 0.814 | 0.814 |
| Fator de influência rugosidade da superfície | [KF]    | 0.873 | 0.873 | 0.927 |
| Fator de endurecimento da superfície         | [KV]    | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| Fator de influência total                    | [K]     | 1.145 | 1.373 | 1.307 |

Nível de segurança disponível para a verificação de resistência permanente:

|                                  |       |        |
|----------------------------------|-------|--------|
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [σmV] | 19.763 |
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [τmV] | 11.410 |

Resistência dos componentes a esforços alternados (N/mm²)

|   |         |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|---------|
|   | [σWK]   | 303.820 | 316.733 | 199.735 |
| Fator de influência sens. média tensão. |         |         |         |         |
|   | [ψσK]   | 0.211   | 0.222   | 0.130   |
| Amplitude tolerável (N/mm²)             | [σADK]  | 2.214   | 214.774 | 176.834 |
| Amplitude tolerável (N/mm²)             | [σANK]  | 2.214   | 214.774 | 176.834 |
| Soma eficaz Miner                       | [DM]    | 0.300   | 0.300   | 0.300   |
| Fator de espectro                       | [fKoll] | 1.000   | 1.000   | 1.000   |



|                                 |          |       |  |  |
|---------------------------------|----------|-------|--|--|
| Segurança contra fadiga         | [S]      | 9.636 |  |  |
| Segurança nominal contra fadiga | [Smin]   | 1.200 |  |  |
| Resultado (%)                   | [S/Smin] | 803.0 |  |  |

Nível de segurança disponível

para a verificação contra ultrapassagem do limite elástico:

|  |          |         |         |         |
|--|----------|---------|---------|---------|
| Sensibilidade ao entalhe estática                        | [K2F]    | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Fator de aumento   | [yF]     | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Limite de escoamento de componentes (N/mm <sup>2</sup> ) |          |         |         |         |
|  | [σFK]    | 617.000 | 617.000 | 356.225 |
| Segurança limite elástico                                | [S]      |         | 8.864   |         |
| Segurança nominal  | [Smin]   |         | 1.200   |         |
| Resultado (%)  | [S/Smin] |         | 738.6   |         |

Nível de segurança disponível

para a verificação da prevenção de fissuras em camadas superficiais duras:

|                   |          |        |  |  |
|-------------------|----------|--------|--|--|
| Segurança fissura | [S]      | 47.000 |  |  |
| Segurança nominal | [Smin]   | 1.200  |  |  |
| Resultado (%)     | [S/Smin] | 3916.7 |  |  |

Indicações:

- A força transversal não é tida em conta no cálculo em conformidade com a norma DIN 743.
- Seção transversal com conexão por interferência: Os fatores de chanfro para o caso "conexão por interferência leve" já não estão definidas na norma DIN 743.

Os fatores são adotados da diretiva FKM; exceto se os fatores para "conexão por interferência fixa" em conformidade com a norma DIN forem menores, esses serão usados.

---

|                  |         |     |
|------------------|---------|-----|
| Fim do Relatório | linhas: | 695 |
|------------------|---------|-----|

---

## Veio B - cálculo da chaveta

KISSsoft Release 03/2017 F

KISSsoft University license - Universidade do Porto

### Arquivo

Nome : Mauro Filipe Rodrigues Rodrigues Domingues  
Modificado por: up201404793 Data: Junho de 2019 Hora: -

## Chaveta [chaveta da engrenagem z2]

Método de cálculo: DIN 6892-B:2012

|   |                          |
|---|--------------------------|
| Designação  | DIN 6885.1:1968 Standard |
| Largura de chaveta (mm)                                     | [b] 32.00                |
| Altura de chaveta (mm)                                      | [h] 18.00                |
| Chanfro (valor médio) (mm)                                  | [r] 0.70                 |
| Diâmetro do eixo (mm)                                       | [d] 121.00               |
| Torque nominal (Nm)   | [T] 7937.85              |
| Fator de aplicação  | [KA] 1.60                |
| Torque equivalente (Nm)                                     | [Teq] 12700.56           |
| Torque máximo (Nm)  | [Tmax] 12700.56          |
| Torque friccional mínimo com conexão por interferência (Nm) | [TRmin] 0.00             |
| Curva de torque: Com torque alternado                       |                          |
| Torque máximo de regresso (Nm)                              | [TmaxR] 0.00             |
| Frequência de mudança de pico de carga                      | [NL] 10000               |
| Frequência de mudança de sentido de carga                   | [NW] 1000                |
| Fator de mudança de sentido de carga                        | [fw] 1.00                |
| Quantidade de chavetas                                      | [i] 1                    |
| Fator de carga  | [phi] 1.00               |
| Força tangencial equivalente (N)                            | [Feq] 209926.69          |
| Força tangencial máxima (N)                                 | [Fmax] 209926.69         |
| Porcentagem suportante para compressão superficial equi.    | [Kneq] 1.00              |
| Porcentagem suportante para compressão superficial máxima   | [Knmax] 1.00             |
| Fator auxiliar  | [Kle] 1.072              |
| Fator de distribuição de carga                              | [KI] 1.072               |
| Fator de atrito   | [KReq] 1.000             |
| Fator de atrito   | [KR] 1.000               |

## Eixo

|                               |                           |
|-------------------------------|---------------------------|
| Material (Entrada própria)    | 18CrNiMo7-6               |
| Tipo                          | Aço de cementação         |
| Tratamento                    | endurecido por cementação |
| Resistência à ruptura (N/mm²) | [Rm] 871.00               |

|  |         |        |
|--|---------|--------|
| Limite de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )            | [Re]    | 617.00 |
| Profundidade da ranhura do eixo (valor mínimo) (mm)    | [t1]    | 11.00  |
| Chanfro no eixo (mm)                                   | [s1]    | 0.01   |
| Comprimento de apoio de chaveta (mm)                   | [ltr]   | 80.00  |
| Altura de chaveta de apoio (mm)                        | [t1tr]  | 8.13   |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                | [peq]   | 345.94 |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                | [pmax]  | 345.94 |
| Fator de suporte                                       | [fs]    | 1.30   |
| Fator de influência de endurecimento                   | [fH]    | 1.15   |
| Compressão superficial admissível (N/mm <sup>2</sup> ) | [pzul]  | 922.41 |
| Fator de frequência de picos de carga                  | [fL]    | 1.40   |
| Fator de mudança de sentido de carga                   | [fw]    | 1.00   |
| Segurança contra fluência (fw * pzul peq)              | [SFeq]  | 2.67   |
| Segurança contra fluência (fL * pzul/pmax)             | [SFmax] | 3.73   |
| Segurança mínima                                       | [SF]    | 2.67   |

### **Cubo**

|   |                            |
|---|----------------------------|
| Material (Entrada própria)                  | 36 CrNiMo 4 (2)            |
| Tipo  | Aço beneficiado            |
| Tratamento                                  | temperado à chama/por ind. |
| Resistência à ruptura (N/mm <sup>2</sup> )  | [Rm] 1200.00               |
| Limite de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> ) | [Re] 1000.00               |

|  |         |         |
|--|---------|---------|
| Profundidade de ranhura de cubo (valor mínimo) (mm)    | [t2]    | 7.40    |
| Chanfro no cubo (mm)                                   | [s2]    | 0.01    |
| Comprimento de apoio de chaveta (mm)                   | [ltr]   | 80.00   |
| Altura de chaveta de apoio (mm)                        | [t2tr]  | 8.45    |
| Pequeno diâmetro externo de cubo (mm)                  | [D1]    | 180.00  |
| Grande diâmetro externo de cubo (mm)                   | [D2]    | 600.00  |
| Largura da peça do cubo com D2 (mm)                    | [c]     | 60.70   |
| Diâmetro de substituição cubo (mm)                     | [D]     | 255.23  |
| Distância a0 (Fig. 2, DIN 6892) (mm)                   | [a0]    | 40.00   |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                | [peq]   | 333.10  |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                | [pmax]  | 333.10  |
| Fator de suporte                                       | [fs]    | 1.50    |
| Fator de influência de endurecimento                   | [fH]    | 1.15    |
| Compressão superficial admissível (N/mm <sup>2</sup> ) | [pzul]  | 1725.00 |
| Fator de frequência de picos de carga                  | [fL]    | 1.40    |
| Fator de mudança de sentido de carga                   | [fw]    | 1.00    |
| Segurança contra fluência (fw * pzul peq)              | [SFeq]  | 5.18    |
| Segurança contra fluência (fL * pzul/pmax)             | [SFmax] | 7.25    |
| Segurança mínima                                       | [SF]    | 5.18    |

### **Chaveta**

|   |                          |
|---|--------------------------|
| Material                                    | C60                      |
| Tipo  | Aço beneficiado          |
| Tratamento                                  | sem liga, beneficiado    |
| Resistência à ruptura (N/mm <sup>2</sup> )  | [Rm] 800.00 (d=16- 40mm) |
| Limite de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> ) | [Re] 520.00 (d=16- 40mm) |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )     | [peq] 345.94 / 333.10    |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )     | [pmax] 345.94 / 333.10   |
| Fator de suporte                            | [fs] 1.10                |

|  |         |         |
|--|---------|---------|
| Fator de influência de endurecimento                   | [fH]    | 1.00    |
| Compressão superficial admissível (N/mm <sup>2</sup> ) | [pzul]  | 572.00  |
| Fator de frequência de picos de carga                  | [fL]    | 1.40    |
| Fator de mudança de sentido de carga                   | [fw]    | 1.00    |
| Segurança contra fluência (fw * pzul peq)              | [SFeq]  | 1.65    |
| Segurança contra fluência (fL * pzul/pmax)             | [SFmax] | 2.31    |
| Segurança mínima                                       | [SF]    | 1.65    |
|  |         |         |
| Superfície de seção transversal (mm <sup>2</sup> )     | [b*ltr] | 2560.00 |
| Esforço de cisalhamento (N/mm <sup>2</sup> )           | [tau]   | 82.00   |

Observações:

Segurança = Mínimo (fw\*pzul/peq, fL\*pzul/pmax)

Condição em conformidade com a norma DIN 6892 Segurança >= 1,0

Chanfro na chaveta Valor médio em conformidade com os exemplos da norma DIN 6892

Profundidade da ranhura: Valor mínimo em conformidade com os exemplos da norma DIN 6892

---

Fim do Relatório

linhas: 133

---

## Veio C (Veio intermédio)

KISSsoft Release 03/2017 F

KISSsoft University license - Universidade do Porto

### Arquivo

Nome : Mauro Filipe Rodrigues Domingues

Modificado por: up201404793

Data: Junho de 2019

Hora: -

## Cálculo de veios, eixos e suportes

### Dados de entrada

Sistema de coordenadas de eixo: ver Fig. W-002

|   |             |
|---|-------------|
| Designação  | Veio C      |
| Desenho   |             |
| Posição de partida (mm)   | 0.000       |
| Comprimento (mm)  | 414.100     |
| Velocidade (1/min)  | 225.56      |
| Sentido de rotação: contrário ao dos ponteiros do relógio             |             |
| Material (Entrada própria)  | 18CrNiMo7-6 |
| Módulo de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )                           | 206000.000  |
| Número de Poisson nu  | 0.300       |
| Densidade (kg/m <sup>3</sup> )  | 7830.000    |
| Coeficiente de dilatação térmica (10 <sup>-6</sup> /K)                | 11.500      |
| Temperatura (°C)  | 20.000      |
| Peso do eixo (kg)   | 51.178      |
| (Observação: Peso válido para o eixo sem ter em conta as engrenagens) |             |
| Peso do eixo, incluindo massas adicionais (kg)                        | 228.657     |
| Momento de inércia de massa (kg*m <sup>2</sup> )                      | 10.855      |
| Momento de inércia GD2 (Nm <sup>2</sup> )                             | 425.945     |
| Peso no sentido ( 0.000, 0.000, -1.000)                               |             |
| Engrenagens consideradas como massas                                  |             |
| Deformações por cisalhamento são tidas em conta                       |             |
| Fator de correção de cisalhamento                                     | 1.100       |
| O ângulo de pressão de mancais de rolamento é tido em conta           |             |
| Zona de tolerância: Valor médio                                       |             |
| Temperatura de referência (°C)  | 20.000      |

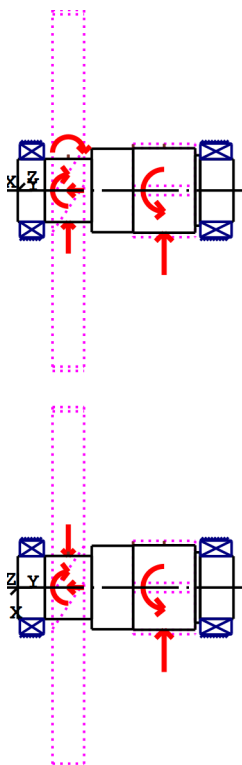


Figura: Aplicações da carga

#### Definição do eixo (Veio C)

##### Contorno externo

Cilindro (cilent) 0.000mm ... 52.000mm

Diâmetro (mm) [d] 120.0000

Comprimento (mm) [l] 52.0000

Rugosidade ( $\mu\text{m}$ ) [Rz] 8.0000

Chanfro esquerda (Chanfro esquerda)

$l=2.00$  (mm),  $\alpha=45.00$  ( $^\circ$ )

Raio direita (Raio direita)

$r=0.50$  (mm),  $Rz=8.0$ , Rodado ( $Ra=3.2\mu\text{m}/125\mu\text{in}$ )

Cilindro (cil1) 52.000mm ... 142.000mm

Diâmetro (mm) [d] 121.0000

Comprimento (mm) [l] 90.0000

Rugosidade ( $\mu\text{m}$ ) [Rz] 8.0000

Raio direita (Raio direita)

$r=1.00$  (mm),  $Rz=8.0$ , Rodado ( $Ra=3.2\mu\text{m}/125\mu\text{in}$ )

Ranhura da chaveta (Ranhura da chaveta)

60.000mm ... 140.000mm

$l=80.00$  (mm),  $i=1$ ,  $Rz=8.0$ , Rodado ( $Ra=3.2\mu\text{m}/125\mu\text{in}$ )

Cilindro (cil2) 142.000mm ... 221.500mm

|                  |      |          |
|------------------|------|----------|
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 160.0000 |
| Comprimento (mm) | [l]  | 79.5000  |
| Rugosidade (µm)  | [Rz] | 8.0000   |

Raio direita (Radius right)

r=1.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

|                        |      |                         |
|------------------------|------|-------------------------|
| <u>Cilindro (cil3)</u> |      | 221.500mm ... 340.600mm |
| Diâmetro (mm)          | [d]  | 162.0000                |
| Comprimento (mm)       | [l]  | 119.1000                |
| Rugosidade (µm)        | [Rz] | 8.0000                  |

|                        |      |                         |
|------------------------|------|-------------------------|
| <u>Cilindro (cil4)</u> |      | 340.600mm ... 350.100mm |
| Diâmetro (mm)          | [d]  | 135.0000                |
| Comprimento (mm)       | [l]  | 9.5000                  |
| Rugosidade (µm)        | [Rz] | 8.0000                  |

Raio esquerda (Raio esquerda)

r=1.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

|                        |      |                         |
|------------------------|------|-------------------------|
| <u>Cilindro (cil5)</u> |      | 350.100mm ... 414.100mm |
| Diâmetro (mm)          | [d]  | 120.0000                |
| Comprimento (mm)       | [l]  | 64.0000                 |
| Rugosidade (µm)        | [Rz] | 8.0000                  |

Chanfro direita (Chanfro direita)

l=2.00 (mm), alpha=45.00 (°)

Entalhe esquerda (Entalhe esquerda)

r=1.00 (mm), t=0.40 (mm), l=6.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

Entrada própria, Forma B, FKM

## Forças

|   |                              |         |
|---|------------------------------|---------|
| Tipo do elemento de força                         | <b>Engrenagem cilíndrica</b> |         |
| Designação no modelo                              | z4                           |         |
| Posição no eixo (mm)                              | [ylocal]                     | 97.0000 |
| Posição no sistema global (mm)                    | [yglobal]                    | 97.0000 |
| Diâmetro primitivo de funcionamento (mm)          | 691.9264                     |         |
| Ângulo oblíquo (°)                                | 15.0721 esquerda             |         |
| Ângulo de pressão                                 | 20.7234                      |         |
| Ângulo de pressão de operação na seção normal (°) | 20.7234                      |         |
| Posição do contato (°)                            | 180.0000                     |         |
| Comprimento da aplicação da força (mm)            | 60.7000                      |         |
| Potência (kW)                                     | 187.5000 acionado (entrada)  |         |
| Torque (Nm)                                       | -7937.8528                   |         |
| Força axial (N)                                   | -6178.8496                   |         |
| Força transversal X (N)                           | 8989.8797                    |         |
| Força transversal Z (N)                           | -22944.2118                  |         |
| Momento fletor X (Nm)                             | 0.0000                       |         |
| Momento fletor Z (Nm)                             | 2137.6545                    |         |

Tipo do elemento de força

**Engrenagem cilíndrica**

|  |           |   |
|--|-----------|---|
| Designação no modelo   |           | z5  |
| Posição no eixo (mm)   | [ylocal]  | 281.0000                                  |
| Posição no sistema global (mm)                                     | [yglobal] | 281.0000                                  |
| Diâmetro primitivo de funcionamento (mm)                           |           | 178.9358                                  |
| Ângulo oblíquo (°)   |           | 25.1594 Helicoidal dupla esquerda-direita |
| Ângulo de pressãoÂngulo de pressão de operação na seção normal (°) |           | 20.9130                                   |
| Posição do contato (°)   |           | 180.0000                                  |
| Comprimento da aplicação da força (mm)                             |           | 119.1000                                  |
| Potência (kW)  |           | 187.5000 acionante (saída)                |
| Torque (Nm)  |           | 7937.8528                                 |
| Força axial (N)  |           | 0.0000                                    |
| Força transversal X (N)  |           | 37456.6761                                |
| Força transversal Z (N)  |           | 88722.9227                                |
| Momento fletor X (Nm)  |           | 0.0000                                    |
| Momento fletor Z (Nm)  |           | 0.0000                                    |

#### Mancal

|                      |  |                              |
|----------------------|--|------------------------------|
| Designação no modelo |  | Rol 5                        |
| Tipo de mancal       |  | Koyo 23024RH                 |
| Design do mancal     |  | Rolamento de rolos oscilante |

|   |                       |             |
|---|-----------------------|-------------|
| Posição do mancal (mm)                      | [ylocal]              | 27.000      |
| Posição do mancal (mm)                      | [yglobal]             | 27.000      |
| Fixação do anel externo                     |                       | Mancal fixo |
| Diâmetro interno (mm)                       | [d]                   | 120.000     |
| Diâmetro externo (mm)                       | [D]                   | 180.000     |
| Largura (mm)                                | [b]                   | 46.000      |
| Raio de canto (mm)                          | [r]                   | 2.000       |
| Classificação da carga estática (kN)        | [C <sub>0</sub> ]     | 524.000     |
| Classificação da carga dinâmica básica (kN) | [C]                   | 394.000     |
| Classificação de carga fadiga (kN)          | [C <sub>u</sub> ]     | 51.600      |
| Valores para a geometria aproximada:        |                       |             |
| Classificação da carga dinâmica básica (kN) | [C <sub>theo</sub> ]  | 0.000       |
| Classificação da carga estática (kN)        | [C <sub>0theo</sub> ] | 0.000       |

|                      |  |                              |
|----------------------|--|------------------------------|
| Designação no modelo |  | Rol 6                        |
| Tipo de mancal       |  | Koyo 24024RH                 |
| Design do mancal     |  | Rolamento de rolos oscilante |

|   |                   |             |
|---|-------------------|-------------|
| Posição do mancal (mm)                      | [ylocal]          | 380.500     |
| Posição do mancal (mm)                      | [yglobal]         | 380.500     |
| Fixação do anel externo                     |                   | Mancal fixo |
| Diâmetro interno (mm)                       | [d]               | 120.000     |
| Diâmetro externo (mm)                       | [D]               | 180.000     |
| Largura (mm)                                | [b]               | 60.000      |
| Raio de canto (mm)                          | [r]               | 2.000       |
| Classificação da carga estática (kN)        | [C <sub>0</sub> ] | 709.000     |
| Classificação da carga dinâmica básica (kN) | [C]               | 484.000     |
| Classificação de carga fadiga (kN)          | [C <sub>u</sub> ] | 61.800      |
| Valores para a geometria aproximada:        |                   |             |
| Classificação da carga dinâmica básica (kN) |                   |             |



|                                      |                       |       |
|--------------------------------------|-----------------------|-------|
| Classificação da carga estática (kN) | [C <sub>theo</sub> ]  | 0.000 |
|                                      | [C <sub>0theo</sub> ] | 0.000 |

-----

Eixo 'Shaft3': A massa do seguinte elemento é tida em conta (y= 97.0000 (mm)): Engrenagem cilíndrica 'z4(GearPair\_const2)'  
 m (yS= 97.0000 (mm)): 173.2494 (kg)  
 Jp: 10.6852 (kg\*m<sup>2</sup>), Jxx: 5.3958 (kg\*m<sup>2</sup>), Jzz: 5.3958 (kg\*m<sup>2</sup>)

-----

Eixo 'Shaft3': A massa do seguinte elemento é tida em conta (y= 221.4750 (mm)): Engrenagem cilíndrica 'z5(GearPair\_const4)'  
 m (yS= 221.4750 (mm)): 0.0020 (kg)  
 Jp: 0.0000 (kg\*m<sup>2</sup>), Jxx: 0.0000 (kg\*m<sup>2</sup>), Jzz: 0.0000 (kg\*m<sup>2</sup>)

-----

Eixo 'Shaft3': A massa do seguinte elemento é tida em conta (y= 281.0250 (mm)): Engrenagem cilíndrica 'z5(GearPair\_const4)'  
 m (yS= 281.0250 (mm)): 4.2273 (kg)  
 Jp: 0.0308 (kg\*m<sup>2</sup>), Jxx: 0.0204 (kg\*m<sup>2</sup>), Jzz: 0.0204 (kg\*m<sup>2</sup>)

## **Resultados**

### **Eixo**

|                         |           |
|-------------------------|-----------|
| Deflexão máxima (µm)    | 55.797    |
| Posição do máximo (mm)  | 251.262   |
| Centro de massa (mm)    | 217.203   |
| Soma da carga axial (N) | -6178.850 |
| Torção sob torque (°)   | 0.024     |

### **Mancal**

|  |                            |       |    |
|--|----------------------------|-------|----|
| Probabilidade de falha   | [n]                        | 10.00 | %  |
| Folga axial  | [u <sub>A</sub> ]          | 10.00 | µm |
| Lubrificante   | Óleo: Klübersynth EG 4-150 |       |    |
| Lubrificante com aditivos, cujo efeito foi avaliado em mancais de rolamento.       |                            |       |    |
| Lubrificação de óleo sem filtragem o com filtro de fluxo paralelo, ISO4406 -/19/16 |                            |       |    |
| Lubrificante - Temperatura de funcionamento  | [T <sub>B</sub> ]          | 60.00 | °C |
| Valor-limite para fator aISO   | [a <sub>ISOmax</sub> ]     | 50.00 |    |
| Nível do óleo  | [h <sub>oil</sub> ]        | 0.00  | mm |
| Lubrificação por imersão em óleo   |                            |       |    |

Mancal de rolamento clássico (considerar ângulo de pressão)

### **Eixo 'Veio C' Mancal de rolamento 'Rol 5'**

|                                   |                   |       |    |
|-----------------------------------|-------------------|-------|----|
| Posição (coordenada Y)            | [y]               | 27.00 | mm |
| carga dinamicamente equivalente   | [P]               | 37.70 | kN |
| Carga equivalente                 | [P <sub>0</sub> ] | 37.43 | kN |
| Fator para probabilidade de falha | [a <sub>1</sub> ] | 1.000 |    |

|   |                      |           |                    |
|---|----------------------|-----------|--------------------|
| Fator modificador de vida   | [a <sub>ISO</sub> ]  | 0.566     |                    |
| Vida útil nominal rolamento   | [L <sub>nh</sub> ]   | 184333.99 | h                  |
| Vida útil modificada rolamento  | [L <sub>nmh</sub> ]  | 104377.16 | h                  |
| Viscosidade operacional   | [v]                  | 62.57     | mm <sup>2</sup> /s |
| Fator de segurança estático   | [S <sub>0</sub> ]    | 14.00     |                    |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>x</sub> ]    | -23.793   | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>y</sub> ]    | 4.542     | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>z</sub> ]    | -4.972    | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>r</sub> ]    | 24.307    | kN (-168.2°)       |
| Torque de reação do mancal  | [M <sub>x</sub> ]    | 0.00      | Nm                 |
| Torque de reação do mancal  | [M <sub>y</sub> ]    | 0.00      | Nm                 |
| Torque de reação do mancal  | [M <sub>z</sub> ]    | 0.00      | Nm                 |
| Torque de reação do mancal  | [M <sub>r</sub> ]    | 0.00      | Nm (9.77°)         |
| Nível do óleo   | [H]                  | 0.000     | mm                 |
| Torque de atrito independentemente da carga[M <sub>0</sub> ]                              |                      | 0.887     | Nm                 |
| Torque de atrito dependendo da carga [M <sub>1</sub> ]                                    |                      | 0.663     | Nm                 |
| Torque de atrito rolamento de rolos cilíndricos[M <sub>2</sub> ]                          |                      | 0.000     | Nm                 |
| Torque de atrito vedações conforme especificado no catálogo principal 4000/IV T DE: 1994  |                      |           |                    |
| Torque de fricção   | [M <sub>loss</sub> ] | 1.550     | Nm                 |
| Potência dissipada  | [P <sub>loss</sub> ] | 36.610    | W                  |
| O torque de atrito é calculado em conformidade com as indicações do catálogo SKF de 1994. |                      |           |                    |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>x</sub> ]    | 47.379    | µm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>y</sub> ]    | -10.000   | µm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>z</sub> ]    | 11.482    | µm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>r</sub> ]    | 48.750    | µm (13.62°)        |
| Inclinação do mancal  | [r <sub>x</sub> ]    | 0.159     | mrاد (0.55')       |
| Inclinação do mancal  | [r <sub>y</sub> ]    | -0.000    | mrاد (0')          |
| Inclinação do mancal  | [r <sub>z</sub> ]    | 0.058     | mrاد (0.2')        |
| Inclinação do mancal  | [r <sub>r</sub> ]    | 0.169     | mrاد (0.58')       |

#### Eixo 'Veio C' Mancal de rolamento 'Rol 6'

|   |                      |          |                    |
|---|----------------------|----------|--------------------|
| Posição (coordenada Y)  | [y]                  | 380.50   | mm                 |
| carga dinamicamente equivalente   | [P]                  | 66.44    | kN                 |
| Carga equivalente   | [P <sub>0</sub> ]    | 66.36    | kN                 |
| Fator para probabilidade de falha   | [a <sub>1</sub> ]    | 1.000    |                    |
| Fator modificador de vida   | [a <sub>ISO</sub> ]  | 0.433    |                    |
| Vida útil nominal rolamento   | [L <sub>nh</sub> ]   | 55377.02 | h                  |
| Vida útil modificada rolamento  | [L <sub>nmh</sub> ]  | 23958.01 | h                  |
| Viscosidade operacional   | [v]                  | 62.57    | mm <sup>2</sup> /s |
| Fator de segurança estático   | [S <sub>0</sub> ]    | 10.68    |                    |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>x</sub> ]    | -22.651  | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>y</sub> ]    | 1.637    | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>z</sub> ]    | -58.561  | kN                 |
| Força de reação do mancal   | [F <sub>r</sub> ]    | 62.789   | kN (-111.15°)      |
| Nível do óleo   | [H]                  | 0.000    | mm                 |
| Torque de atrito independentemente da carga[M <sub>0</sub> ]                              |                      | 1.281    | Nm                 |
| Torque de atrito dependendo da carga [M <sub>1</sub> ]                                    |                      | 3.002    | Nm                 |
| Torque de atrito rolamento de rolos cilíndricos[M <sub>2</sub> ]                          |                      | 0.000    | Nm                 |
| Torque de atrito vedações conforme especificado no catálogo principal 4000/IV T DE: 1994  |                      |          |                    |
| Torque de fricção   | [M <sub>loss</sub> ] | 4.283    | Nm                 |
| Potência dissipada  | [P <sub>loss</sub> ] | 101.170  | W                  |
| O torque de atrito é calculado em conformidade com as indicações do catálogo SKF de 1994. |                      |          |                    |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>x</sub> ]    | 17.490   | µm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>y</sub> ]    | -10.000  | µm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>z</sub> ]    | 45.505   | µm                 |
| Deslocamento do mancal  | [u <sub>r</sub> ]    | 48.750   | µm (68.98°)        |

|                      |         |       |              |
|----------------------|---------|-------|--------------|
| Inclinação do mancal | $[r_x]$ | 0.008 | mrاد (0.03') |
| Inclinação do mancal | $[r_y]$ | 0.426 | mrاد (1.47') |
| Inclinação do mancal | $[r_z]$ | 0.123 | mrاد (0.42') |
| Inclinação do mancal | $[r_r]$ | 0.124 | mrاد (0.43') |

Dano (%) [Lreq] ( 20000.000)

| Condição de carga | B1    | B2    |
|-------------------|-------|-------|
| 1                 | 19.16 | 83.48 |

Σ 19.16 83.48

Utilização (%) [Lreq] ( 20000.000)

| B1    | B2    |
|-------|-------|
| 60.92 | 94.73 |

Indicação: Utilização =  $(L_{req}/L_h)^{1/k}$

Rolamento de esferas:  $k = 3$ , mancal de rolamento:  $k = 10/3$

B1: RollerBearing5

B2: RollerBearing6

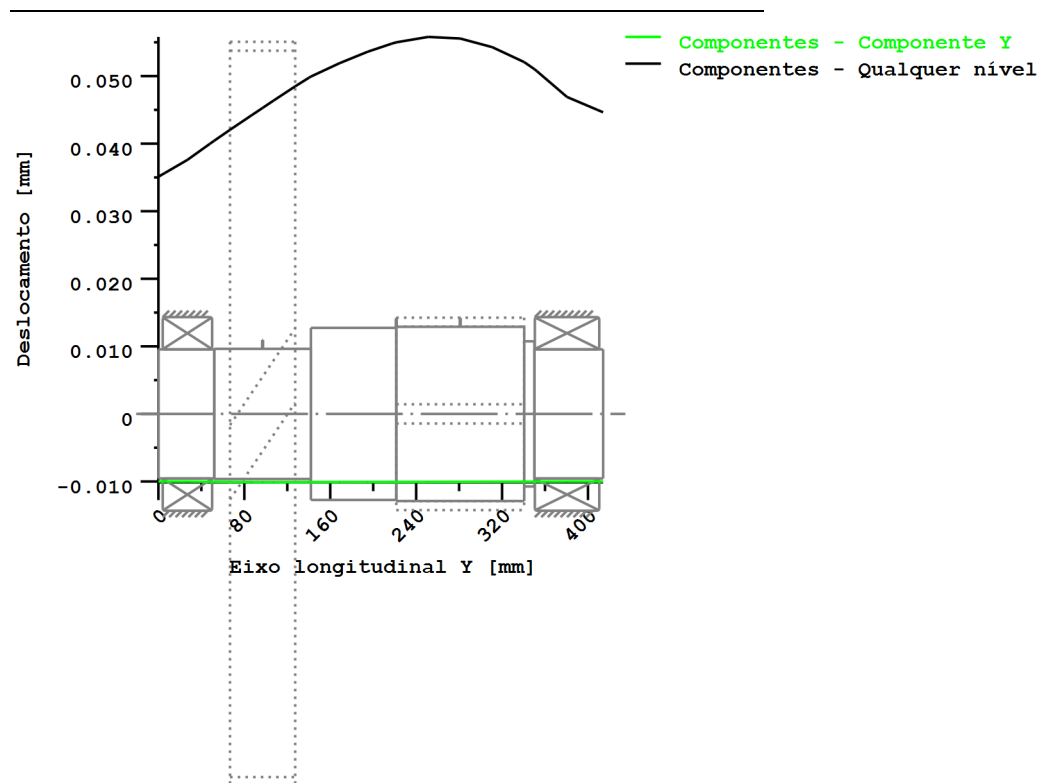
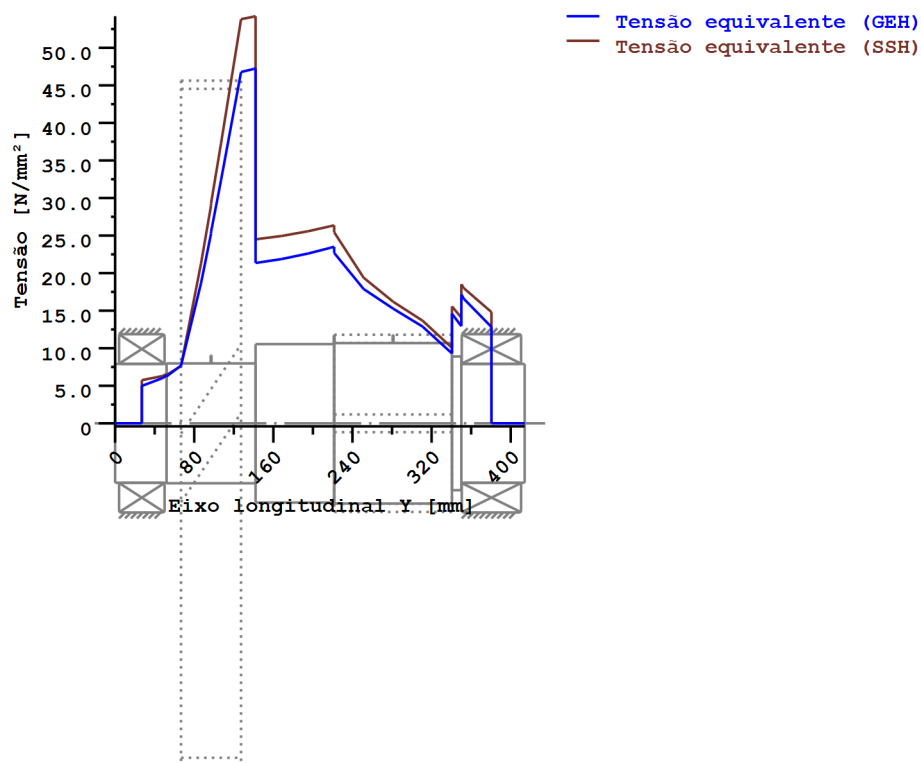


Figura: Deformação (linhas de flexão, etc.) (Qualquer nível 53.16059608 121)



Tensões nominais, sem ter em conta as concentrações de tensão

GEH(von Mises):  $\sigma_V = ((\sigma_B + \sigma_Z, D)^2 + 3 \cdot (\tau_T + \tau_S)^2)^{1/2}$

SSH(Tresca):  $\sigma_V = ((\sigma_B - \sigma_Z, D)^2 + 4 \cdot (\tau_T + \tau_S)^2)^{1/2}$

Figura: Tensão equivalente

**Cálculo da resistência em conformidade com DIN 743:2012  
com fadiga a baixo número de ciclos análoga à diretriz FKM e ao projeto FVA**

**Resumo**

**Veio C**

|                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| Material                  | 18CrNiMo7-6               |
| Tipo de material          | Aço de cementação         |
| Tratamento do material    | endurecido por cementação |
| Tratamento de superfícies | Nenhum                    |

Cálculo da fadiga a baixo número de ciclos e da resistência estática

Cálculo para caso de esforço 2 ( $\sigma_{av}/\sigma_{mv} = \text{const}$ )

| Seção transversal | Posição (coord Y) (mm) |                  |
|-------------------|------------------------|------------------|
| A-A               | 142.00                 | Ressalto do eixo |
| B-B               | 139.99                 | Chaveta          |
| C-C               | 140.01                 | Eixo liso        |
| D-D               | 340.60                 | Ressalto do eixo |

Resultados:

| Seção transversal | Kfb  | Kfs  | K2d  | SD    | SS    | SA    |
|-------------------|------|------|------|-------|-------|-------|
| A-A               | 2.87 | 0.87 | 0.81 | 5.79  | 8.91  | 17.60 |
| B-B               | 2.98 | 1.00 | 0.81 | 6.20  | 8.93  | 23.40 |
| C-C               | 1.00 | 0.87 | 0.81 | 9.77  | 8.92  | 48.15 |
| D-D               | 2.84 | 0.87 | 0.81 | 11.35 | 34.58 | 34.54 |

|                      |      |      |      |
|----------------------|------|------|------|
| Seguranças nominais: | 1.20 | 1.20 | 1.20 |
|----------------------|------|------|------|

Abreviaturas:

Kfb: Fator de entalhe flexão

Kfs: Fator de superfície

K2d: fator dimensional flexão

SD: Segurança resistência à fadiga

SS: Segurança limite de elasticidade

SA: Segurança fissura

**Vida útil e dano**

Tempo de vida útil do sistema (h) [Hatt] 1000000.00

Dano do sistema (%) [D] 0.00

Dano (%) [H] ( 20000.0 h)

Cálculo da confiabilidade R(t) com distribuição Weibull; t em (h):

$$R(t) = 100 * \exp(-((t^{\text{fac}} - t_0)/(T - t_0))^b) \%$$

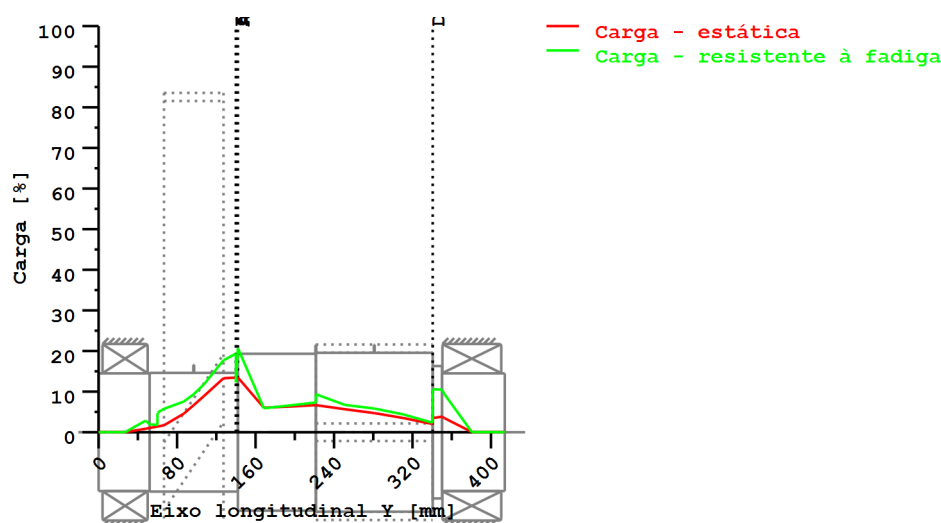
| Welle | fac   | b   | t0         | T          |
|-------|-------|-----|------------|------------|
| 1     | 13534 | 1.5 | 1.234e+010 | 2.617e+010 |

Dano da seção transversal (%) [D]  
A-A: 0.00

|      |      |
|------|------|
| B-B: | 0.00 |
| C-C: | 0.00 |
| D-D: | 0.00 |

**Utilização (%) [Smin/S]**

| Seção transversal     | Estática | Resistente à fadiga |
|-----------------------|----------|---------------------|
| A-A                   | 13.474   | 20.720              |
| B-B                   | 13.445   | 19.366              |
| C-C                   | 13.445   | 12.282              |
| D-D                   | 3.474    | 10.574              |
| Utilização máxima (%) | [A]      | 20.720              |



Utilização =  $S_{min}/S$  (%)

Figura: Resistência

## Detalhes de cálculo

### Indicações gerais

|                    |        |        |  |
|--------------------|--------|--------|--|
| Designação         | Veio C |        |  |
| Desenho            |        |        |  |
| Comprimento (mm)   | [l]    | 414.10 |  |
| Velocidade (1/min) | [n]    | 225.56 |  |

|                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| Material                  | 18CrNiMo7-6               |
| Tipo de material          | Aço de cementação         |
| Tratamento do material    | endurecido por cementação |
| Tratamento de superfícies | Nenhum                    |

|                                     | Tração/pressão | Flexão | Torção | Cisalhamento |
|-------------------------------------|----------------|--------|--------|--------------|
| Fator de carga cálculo estático     | 1.700          | 1.700  | 1.700  | 1.700        |
| Fator de carga resistência à fadiga | 1.000          | 1.000  | 1.000  | 1.000        |

Resistência à ruptura de unidade de controle (D= 170.00 mm) (N/mm<sup>2</sup>) [R<sub>m</sub> d= 170.00] 871.00

Limite de elasticidade Unidade de controle (D= 170.00 mm) (N/mm<sup>2</sup>) [R<sub>p</sub> d= 170.00] 617.00

|   |                  |
|---|------------------|
| [σ <sub>zd</sub> W] (bei dB) (N/mm <sup>2</sup> ) | 348.00           |
| [σ <sub>b</sub> W] (bei dB) (N/mm <sup>2</sup> )  | 435.00           |
| [τ <sub>t</sub> W] (bei dB) (N/mm <sup>2</sup> )  | 261.00           |
| Espessura matéria-prima (mm)                      | [dWerkst] 170.00 |

Dados do material (σ<sub>Beff</sub>, σ<sub>Seff</sub>) em conformidade com as normas do material

Resistência a alternância calculada com K<sub>1</sub>(d), em conformidade com a norma DIN 743/3

Fator geométrico de dimensões K<sub>1</sub>d calculado com diâmetro de eixo D

Valores de resistência de material determinados a partir do diâmetro do eixo

(Requisito: melhoramento do eixo torneado)

Indicação: Os seguintes valores de materiais são válidos só exatamente para a primeira seção transversal; os outros são determinados de acordo com o respectivo "Diâmetro para fator dimensional".

|                  |         |
|------------------|---------|
| [σBeff] (N/mm²)  | 871.00  |
| [σSeff] (N/mm²)  | 617.00  |
| [σbF] (N/mm²)    | 617.00  |
| [τtF] (N/mm²)    | 356.23  |
| [σBRand] (N/mm²) | 2300.00 |

|                |        |
|----------------|--------|
| [σzdW] (N/mm²) | 348.00 |
| [σbW] (N/mm²)  | 435.00 |
| [τtW] (N/mm²)  | 261.00 |

|   |               |
|---|---------------|
| Fadiga a baixo número de ciclos para solicitação de nível único |               |
| Vida útil nominal [H]   | 20000.00      |
| Número de ciclos de carga [NL]                                  | 270.677       |
| Dados da linha "Wöhler" semelhantes aos da diretiva FKM:        |               |
| [kσ, kτ]  | 15 25         |
| [kDσ, kDτ]  | 0 0           |
| [NDσ, NDτ]  | 1e+006 1e+006 |
| [NDσII, NDτII]  | 0 0           |

Cálculo para caso de esforço 2 ( $\sigma_{av}/\sigma_{mv} = \text{const}$ )

### Seção transversal 'A-A' Ressalto do eixo

|                                      |             |         |                  |  |
|--------------------------------------|-------------|---------|------------------|--|
| Comentário                           | Y= 142.00mm |         |                  |  |
| Posição (coordenada Y) (mm)          | [y]         | 142.000 |                  |  |
| Diâmetro externo (mm)                | [da]        | 121.000 |                  |  |
| Diâmetro interno (mm)                | [di]        | 0.000   |                  |  |
| Diâmetro para fator dimensional (mm) | [deff]      | 160.000 |                  |  |
| Efeito de entalhe                    |             |         | Ressalto do eixo |  |
| [D, r, t] (mm)                       | 160.000     | 1.000   | 19.500           |  |
| Rugosidade média (μm)                |             | [Rz]    | 8.000            |  |

|  |  | Tração/pressão | Flexão   | Torção   | Cisalhamento |
|--|--|----------------|----------|----------|--------------|
| Carga: (N) (Nm)                                  |  |                |          |          |              |
| Valor médio                                      |  |                |          |          |              |
| [Fzdm, Mbm, Tm, Fqm]                             |  | 818.3          | 0.0      | 3968.9   | 0.0          |
| Deflexão (amplitude) [Fzda, Mba, Ta, Fqa]        |  | 818.3          | 1700.4   | 3968.9   | 33224.3      |
| Valor máximo [Fzdmax, Mbmax, Tmax, Fqmax]        |  | 2782.1         | 2890.6   | 13494.3  | 56481.3      |
| Seção transversal, torques de resistência: (mm²) |  |                |          |          |              |
| [A, Wb, Wt, A]                                   |  | 11499.0        | 173922.6 | 347845.2 | 11499.0      |

|   |       |        |        |       |
|---|-------|--------|--------|-------|
| Tensões: (N/mm <sup>2</sup> )                     |       |        |        |       |
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm <sup>2</sup> )         | 0.071 | 0.000  | 11.410 | 0.000 |
| [σzda, σba, τa, τqa] (N/mm <sup>2</sup> )         | 0.071 | 9.777  | 11.410 | 3.852 |
| [σzdmax, σbmax, τmax, τqmax] (N/mm <sup>2</sup> ) | 0.242 | 16.620 | 38.794 | 6.549 |

|                                |          |       |
|--------------------------------|----------|-------|
| Efeito tecnológico de tamanhos | [K1(σB)] | 1.000 |
|                                | [K1(σS)] | 1.000 |

|  |         | Tração/pressão | Flexão | Torção |
|--|---------|----------------|--------|--------|
| Coefficiente de forma                        | [a]     | 4.305          | 3.764  | 2.413  |
| Quebra de tensão relacionada                 | [G']    | 2.417          | 2.417  | 1.150  |
| Sensibilidade ao entalhe                     | [n]     | 1.310          | 1.310  | 1.214  |
| Coefficiente de efeito de entalhe            | [β]     | 3.285          | 2.873  | 1.988  |
| Efeito geométrico de tamanhos                | [K2(d)] | 1.000          | 0.814  | 0.814  |
| Fator de influência rugosidade da superfície | [KF]    | 0.873          | 0.873  | 0.927  |
| Fator de endurecimento da superfície         | [KV]    | 1.000          | 1.000  | 1.000  |
| Fator de influência total                    | [K]     | 3.431          | 3.673  | 2.520  |

Nível de segurança disponível para a verificação de resistência permanente:

|                                  |       |        |
|----------------------------------|-------|--------|
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [σmV] | 19.763 |
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [τmV] | 11.410 |

Resistência dos componentes a esforços alternados (N/mm²)

|   |         |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|---------|
|   | [σWK]   | 101.433 | 118.419 | 103.588 |
| Fator de influência sens. média tensão. |         |         |         |         |
|   | [ψσK]   | 0.062   | 0.073   | 0.063   |
| Amplitude tolerável (N/mm²)             | [σADK]  | 2.214   | 103.203 | 97.428  |
| Amplitude tolerável (N/mm²)             | [σANK]  | 2.214   | 103.203 | 97.428  |
| Soma eficaz Miner                       | [DM]    | 0.300   | 0.300   | 0.300   |
| Fator de espectro                       | [fKoll] | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Segurança contra fadiga                 | [S]     |         | 5.792   |         |



|                                 |          |       |  |  |
|---------------------------------|----------|-------|--|--|
| Segurança nominal contra fadiga | [Smin]   | 1.200 |  |  |
| Resultado (%)                   | [S/Smin] | 482.6 |  |  |

Nível de segurança disponível

para a verificação contra ultrapassagem do limite elástico:

|   |          |         |         |         |
|---|----------|---------|---------|---------|
| Sensibilidade ao entalhe estática           | [K2F]    | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Fator de aumento                            | [γF]     | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Limite de escoamento de componentes (N/mm²) |          |         |         |         |
|   | [σFK]    | 617.000 | 617.000 | 356.225 |
| Segurança limite elástico                   | [S]      |         | 8.906   |         |
| Segurança nominal                           | [Smin]   |         | 1.200   |         |
| Resultado (%)                               | [S/Smin] |         | 742.2   |         |

Nível de segurança disponível

para a verificação da prevenção de fissuras em camadas superficiais duras:

|                   |          |        |  |  |
|-------------------|----------|--------|--|--|
| Segurança fissura | [S]      | 17.602 |  |  |
| Segurança nominal | [Smin]   | 1.200  |  |  |
| Resultado (%)     | [S/Smin] | 1466.9 |  |  |

### Seção transversal 'B-B' Chaveta

Comentário Y= 60.00...140.00mm

|                                      |                          |         |  |  |
|--------------------------------------|--------------------------|---------|--|--|
| Posição (coordenada Y) (mm)          | [y]                      | 139.990 |  |  |
| Diâmetro externo (mm)                | [da]                     | 121.000 |  |  |
| Diâmetro interno (mm)                | [di]                     | 0.000   |  |  |
| Diâmetro para fator dimensional (mm) | [deff]                   | 121.000 |  |  |
| Efeito de entalhe                    |                          | Chaveta |  |  |
| Quantidade de chavetas               | [n]                      | 1       |  |  |
| Ranhura usinada com fresa de topo    |                          |         |  |  |
| Norma:                               | DIN 6885.1:1968 Standard |         |  |  |
| [b, t] (mm)                          | 32.000 11.100            |         |  |  |
| Rugosidade média (μm)                | [Rz]                     | 8.000   |  |  |

| Carga: (N) (Nm)                                  |  | Tração/pressão | Flexão   | Torção   | Cisalhamento |
|--|--|----------------|----------|----------|--------------|
| Valor médio                                      |  |                |          |          |              |
| [Fzdm, Mbm, Tm, Fqm]                             |  | 818.3          | 0.0      | 3968.9   | 0.0          |
| Deflexão (amplitude) [Fzda, Mba, Ta, Fqa]        |  | 818.3          | 1637.7   | 3968.9   | 33222.7      |
| Valor máximo [Fzdm, Mbmax, Tmax, Fqmax]          |  | 2782.1         | 2784.1   | 13494.3  | 56478.6      |
| Seção transversal, torques de resistência: (mm²) |  |                |          |          |              |
| [A, Wb, Wt, A]                                   |  | 11499.0        | 173922.6 | 347845.2 | 11499.0      |

|                              |  |       |        |        |       |
|------------------------------|--|-------|--------|--------|-------|
| Tensões: (N/mm²)             |  |       |        |        |       |
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm²) |  | 0.071 | 0.000  | 11.410 | 0.000 |
| [σzda, σba, τa, τqa] (N/mm²) |  | 0.071 | 9.416  | 11.410 | 3.852 |
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm²) |  | 0.242 | 16.008 | 38.794 | 6.549 |

|                                |          |       |  |  |  |
|--------------------------------|----------|-------|--|--|--|
| Efeito tecnológico de tamanhos | [K1(σB)] | 1.000 |  |  |  |
|                                | [K1(σS)] | 1.000 |  |  |  |

|  |          | Tração/pressão | Flexão | Torção |  |
|--|----------|----------------|--------|--------|--|
| Coeficiente de efeito de entalhe   | [β(dB)]  | 2.871          | 2.871  | 1.771  |  |
| [dB] (mm) = 40.0   |          |                |        |        |  |
| Efeito geométrico de tamanhos  | [K3(d)]  | 0.915          | 0.915  | 0.954  |  |
| Efeito geométrico de tamanhos  | [K3(dB)] | 0.949          | 0.949  | 0.972  |  |
| Coeficiente de efeito de entalhe   | [β]      | 2.977          | 2.977  | 1.805  |  |
| Efeito geométrico de tamanhos  | [K2(d)]  | 1.000          | 0.814  | 0.814  |  |
| Fator de influência rugosidade da superfície   | [KF]     | 1.000          | 1.000  | 1.000  |  |
| O fator de rugosidade está incluído no coeficiente de efeito de entalhe, em conformidade com a norma |          |                |        |        |  |
| Fator de endurecimento da superfície   | [KV]     | 1.000          | 1.000  | 1.000  |  |
| Fator de influência total  | [K]      | 2.977          | 3.656  | 2.217  |  |

Nível de segurança disponível para a verificação de resistência permanente:

|                                  |       |        |  |  |
|----------------------------------|-------|--------|--|--|
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [σmV] | 19.763 |  |  |
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [τmV] | 11.410 |  |  |

Resistência dos componentes a esforços alternados (N/mm²)

|   |       |         |         |         |
|---|-------|---------|---------|---------|
|   | [σWK] | 116.888 | 118.984 | 117.749 |
| Fator de influência sens. média tensão. | [ψσK] | 0.072   | 0.073   | 0.072   |

|                                 |          |       |         |         |
|---------------------------------|----------|-------|---------|---------|
| Amplitude tolerável (N/mm²)     | [σADK]   | 2.214 | 103.118 | 109.790 |
| Amplitude tolerável (N/mm²)     | [σANK]   | 2.214 | 103.118 | 109.790 |
| Soma eficaz Miner               | [DM]     | 0.300 | 0.300   | 0.300   |
| Fator de espectro               | [fKoll]  | 1.000 | 1.000   | 1.000   |
| Segurança contra fadiga         | [S]      |       | 6.197   |         |
| Segurança nominal contra fadiga | [Smin]   |       | 1.200   |         |
| Resultado (%)                   | [S/Smin] |       | 516.4   |         |

Nível de segurança disponível

para a verificação contra ultrapassagem do limite elástico:

|   |          |         |         |         |
|---|----------|---------|---------|---------|
| Sensibilidade ao entalhe estática           | [K2F]    | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Fator de aumento                            | [γF]     | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Limite de escoamento de componentes (N/mm²) |          |         |         |         |
|   | [σFK]    | 617.000 | 617.000 | 356.225 |
| Segurança limite elástico                   | [S]      |         | 8.925   |         |
| Segurança nominal                           | [Smin]   |         | 1.200   |         |
| Resultado (%)                               | [S/Smin] |         | 743.8   |         |

Nível de segurança disponível

para a verificação da prevenção de fissuras em camadas superficiais duras:

|                   |          |  |        |  |
|-------------------|----------|--|--------|--|
| Segurança fissura | [S]      |  | 23.404 |  |
| Segurança nominal | [Smin]   |  | 1.200  |  |
| Resultado (%)     | [S/Smin] |  | 1950.3 |  |

### Seção transversal 'C-C' Eixo liso

Comentário

|                                      |        |           |         |  |
|--------------------------------------|--------|-----------|---------|--|
| Posição (coordenada Y) (mm)          | [y]    |           | 140.010 |  |
| Diâmetro externo (mm)                | [da]   |           | 121.000 |  |
| Diâmetro interno (mm)                | [di]   |           | 0.000   |  |
| Diâmetro para fator dimensional (mm) | [deff] |           | 121.000 |  |
| Efeito de entalhe                    |        | Eixo liso |         |  |
| Rugosidade média (μm)                | [Rz]   |           | 8.000   |  |

Carga: (N) (Nm)

Valor médio

|  |                      |         |          |          |         |
|--|----------------------|---------|----------|----------|---------|
|  | [Fzdm, Mbm, Tm, Fqm] | 818.3   | 0.0      | 3968.9   | 0.0     |
| Deflexão (amplitude)                             | [Fzda, Mba, Ta, Fqa] | 818.3   | 1638.4   | 3968.9   | 33222.7 |
| Valor máximo [Fzdmax, Mbmax, Tmax, Fqmax]        |                      | 2782.1  | 2785.2   | 13494.3  | 56478.6 |
| Seção transversal, torques de resistência: (mm²) |                      |         |          |          |         |
| [A, Wb, Wt, A]                                   |                      | 11499.0 | 173922.6 | 347845.2 | 11499.0 |

Tensões: (N/mm²)

|                              |       |        |        |       |
|------------------------------|-------|--------|--------|-------|
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm²) | 0.071 | 0.000  | 11.410 | 0.000 |
| [σzda, σba, ta, τqa] (N/mm²) | 0.071 | 9.420  | 11.410 | 3.852 |
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm²) | 0.242 | 16.014 | 38.794 | 6.549 |

Efeito tecnológico de tamanhos

|          |       |
|----------|-------|
| [K1(σB)] | 1.000 |
| [K1(σS)] | 1.000 |

Tração/pressão Flexão Torção

|  |         |       |       |       |
|--|---------|-------|-------|-------|
| Coeficiente de efeito de entalhe             | [β]     | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| Efeito geométrico de tamanhos                | [K2(d)] | 1.000 | 0.814 | 0.814 |
| Fator de influência rugosidade da superfície | [KF]    | 0.873 | 0.873 | 0.927 |
| Fator de endurecimento da superfície         | [KV]    | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| Fator de influência total                    | [K]     | 1.145 | 1.373 | 1.307 |

Nível de segurança disponível para a verificação de resistência permanente:

|                                  |       |        |
|----------------------------------|-------|--------|
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [σmV] | 19.763 |
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [τmV] | 11.410 |

Resistência dos componentes a esforços alternados (N/mm²)

|   |         |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|---------|
|   | [σWK]   | 303.820 | 316.733 | 199.735 |
| Fator de influência sens. média tensão. |         |         |         |         |
|   | [ψσK]   | 0.211   | 0.222   | 0.130   |
| Amplitude tolerável (N/mm²)             | [σADK]  | 2.214   | 199.163 | 176.834 |
| Amplitude tolerável (N/mm²)             | [σANK]  | 2.214   | 199.163 | 176.834 |
| Soma eficaz Miner                       | [DM]    | 0.300   | 0.300   | 0.300   |
| Fator de espectro                       | [fKoll] | 1.000   | 1.000   | 1.000   |

|                                 |          |       |
|---------------------------------|----------|-------|
| Segurança contra fadiga         | [S]      | 9.771 |
| Segurança nominal contra fadiga | [Smin]   | 1.200 |
| Resultado (%)                   | [S/Smin] | 814.2 |

Nível de segurança disponível  
para a verificação contra ultrapassagem do limite elástico:

|  |          |         |         |         |
|--|----------|---------|---------|---------|
| Sensibilidade ao entalhe estática                        | [K2F]    | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Fator de aumento   | [yF]     | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Limite de escoamento de componentes (N/mm <sup>2</sup> ) |          |         |         |         |
|  | [σFK]    | 617.000 | 617.000 | 356.225 |
| Segurança limite elástico                                | [S]      |         | 8.925   |         |
| Segurança nominal  | [Smin]   |         | 1.200   |         |
| Resultado (%)  | [S/Smin] |         | 743.7   |         |

Nível de segurança disponível

para a verificação da prevenção de fissuras em camadas superficiais duras:

|                   |          |        |
|-------------------|----------|--------|
| Segurança fissura | [S]      | 48.153 |
| Segurança nominal | [Smin]   | 1.200  |
| Resultado (%)     | [S/Smin] | 4012.7 |

### Seção transversal 'D-D' Ressalto do eixo

|                                      |             |         |         |                  |
|--------------------------------------|-------------|---------|---------|------------------|
| Comentário                           | Y= 340.60mm |         |         |                  |
| Posição (coordenada Y) (mm)          | [y]         |         | 340.600 |                  |
| Diâmetro externo (mm)                | [da]        |         | 135.000 |                  |
| Diâmetro interno (mm)                | [di]        |         | 0.000   |                  |
| Diâmetro para fator dimensional (mm) | [deff]      |         | 162.000 |                  |
| Efeito de entalhe                    |             |         |         | Ressalto do eixo |
| [D, r, t] (mm)                       |             | 162.000 | 1.000   | 13.500           |
| Rugosidade média (μm)                | [Rz]        |         |         | 8.000            |

|   |  | Tração/pressão | Flexão   | Torção   | Cisalhamento |
|---|--|----------------|----------|----------|--------------|
| Carga: (N) (Nm)   |  |                |          |          |              |
| Valor médio   |  |                |          |          |              |
| [Fzdm, Mbm, Tm, Fqm]  |  | 818.3          | 0.0      | 0.0      | 0.0          |
| Deflexão (amplitude) [Fzda, Mba, Ta, Fqa]                     |  | 818.3          | 2507.5   | 0.0      | 62850.7      |
| Valor máximo [Fzdmax, Mbmax, Tmax, Fqmax]                     |  | 2782.1         | 4262.7   | 0.0      | 106846.2     |
| Seção transversal, torques de resistência: (mm <sup>2</sup> ) |  |                |          |          |              |
| [A, Wb, Wt, A]  |  | 14313.9        | 241546.8 | 483093.5 | 14313.9      |

|                                   |       |        |       |       |
|-----------------------------------|-------|--------|-------|-------|
| Tensões: (N/mm²)                  |       |        |       |       |
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm²)      | 0.057 | 0.000  | 0.000 | 0.000 |
| [σzda, σba, τa, τqa] (N/mm²)      | 0.057 | 10.381 | 0.000 | 5.855 |
| [σzdmax,σbmax,τmax,τqmax] (N/mm²) | 0.194 | 17.648 | 0.000 | 9.953 |

|                                |          |       |
|--------------------------------|----------|-------|
| Efeito tecnológico de tamanhos | [K1(σB)] | 1.000 |
|                                | [K1(σS)] | 1.000 |

|  |         | Tração/pressão | Flexão | Torção |
|--|---------|----------------|--------|--------|
| Coefficiente de forma                        | [a]     | 4.173          | 3.727  | 2.353  |
| Quebra de tensão relacionada                 | [G']    | 2.438          | 2.438  | 1.150  |
| Sensibilidade ao entalhe                     | [n]     | 1.312          | 1.312  | 1.214  |
| Coefficiente de efeito de entalhe            | [β]     | 3.182          | 2.842  | 1.938  |
| Efeito geométrico de tamanhos                | [K2(d)] | 1.000          | 0.807  | 0.807  |
| Fator de influência rugosidade da superfície | [KF]    | 0.873          | 0.873  | 0.927  |
| Fator de endurecimento da superfície         | [KV]    | 1.000          | 1.000  | 1.000  |
| Fator de influência total                    | [K]     | 3.327          | 3.666  | 2.480  |

Nível de segurança disponível para a verificação de resistência permanente:

|   |       |       |
|---|-------|-------|
| Tensão média equivalente (N/mm <sup>2</sup> ) | [σmV] | 0.057 |
| Tensão média equivalente (N/mm <sup>2</sup> ) | [τmV] | 0.033 |

Resistência dos componentes a esforços alternados (N/mm<sup>2</sup>)

|  |         |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|---------|
|  | [σWK]   | 104.592 | 118.642 | 105.224 |
| Fator de influência sens. média tensão.  |         |         |         |         |
|  | [ψσK]   | 0.064   | 0.073   | 0.064   |
| Amplitude tolerável (N/mm <sup>2</sup> ) | [σADK]  | 98.313  | 118.594 | 10.476  |
| Amplitude tolerável (N/mm <sup>2</sup> ) | [σANK]  | 98.313  | 118.594 | 10.476  |
| Soma eficaz Miner                        | [DM]    | 0.300   | 0.300   | 0.300   |
| Fator de espectro                        | [fKoll] | 1.000   | 1.000   | 1.000   |

|                                 |          |        |
|---------------------------------|----------|--------|
| Segurança contra fadiga         | [S]      | 11.349 |
| Segurança nominal contra fadiga | [Smin]   | 1.200  |
| Resultado (%)                   | [S/Smin] | 945.7  |

Nível de segurança disponível

para a verificação contra ultrapassagem do limite elástico:

|  |          |         |         |         |
|--|----------|---------|---------|---------|
| Sensibilidade ao entalhe estática                        | [K2F]    | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Fator de aumento   | [yF]     | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Limite de escoamento de componentes (N/mm <sup>2</sup> ) |          |         |         |         |
|  | [σFK]    | 617.000 | 617.000 | 356.225 |
| Segurança limite elástico                                | [S]      |         | 34.581  |         |
| Segurança nominal  | [Smin]   |         | 1.200   |         |
| Resultado (%)  | [S/Smin] |         | 2878.7  |         |

Nível de segurança disponível

para a verificação da prevenção de fissuras em camadas superficiais duras:

|                   |          |        |
|-------------------|----------|--------|
| Segurança fissura | [S]      | 34.544 |
| Segurança nominal | [Smin]   | 1.200  |
| Resultado (%)     | [S/Smin] | 2878.7 |

Indicações:

- A força transversal não é tida em conta no cálculo em conformidade com a norma DIN 743.
- Seção transversal com conexão por interferência: Os fatores de chanfro para o caso "conexão por interferência leve" já não estão definidas na norma DIN 743.

Os fatores são adotados da diretiva FKM; exceto se os fatores para "conexão por interferência fixa" em conformidade com a norma DIN forem menores, esses serão usados.

---

|                  |         |     |
|------------------|---------|-----|
| Fim do Relatório | linhas: | 774 |
|------------------|---------|-----|

---

## Veio C - cálculo da chaveta

KISSsoft Release 03/2017 F

KISSsoft University license - Universidade do Porto

### Arquivo

Nome : Mauro Filipe Rodrigues Domingues  
Modificado por: up201404793 Data: Junho de 2019 Hora: -

## Chaveta [acoplamento engrenagem z4]

Método de cálculo: DIN 6892-B:2012

|   |                          |           |
|---|--------------------------|-----------|
| Designação  | DIN 6885.1:1968 Standard |           |
| Largura de chaveta (mm)                                     | [b]                      | 32.00     |
| Altura de chaveta (mm)                                      | [h]                      | 18.00     |
| Chanfro (valor médio) (mm)                                  | [r]                      | 0.70      |
| Diâmetro do eixo (mm)                                       | [d]                      | 121.00    |
| Torque nominal (Nm)   | [T]                      | 7937.85   |
| Fator de aplicação  | [KA]                     | 1.60      |
| Torque equivalente (Nm)                                     | [Teq]                    | 12700.56  |
| Torque máximo (Nm)  | [Tmax]                   | 12700.56  |
| Torque friccional mínimo com conexão por interferência (Nm) | [TRmin]                  | 0.00      |
| Curva de torque: Com torque alternado                       |                          |           |
| Torque máximo de regresso (Nm)                              | [TmaxR]                  | 0.00      |
| Frequência de mudança de pico de carga                      | [NL]                     | 10000     |
| Frequência de mudança de sentido de carga                   | [NW]                     | 1000      |
| Fator de mudança de sentido de carga                        | [fw]                     | 1.00      |
| Quantidade de chavetas                                      | [i]                      | 1         |
| Fator de carga  | [phi]                    | 1.00      |
| Força tangencialequivalente (N)                             | [Feq]                    | 209926.69 |
| Força tangencial máxima (N)                                 | [Fmax]                   | 209926.69 |
| Porcentagem suportante para compressão superficial equi.    | [Kneq]                   | 1.00      |
| Porcentagem suportante para compressão superficial máxima   | [Knmax]                  | 1.00      |
| Fator auxiliar  | [Kle]                    | 1.072     |
| Fator de distribuição de carga                              | [KI]                     | 1.072     |
| Fator de atrito   | [KReq]                   | 1.000     |
| Fator de atrito   | [KR]                     | 1.000     |

## Eixo

|                               |                           |
|-------------------------------|---------------------------|
| Material (Entrada própria)    | 18CrNiMo7-6               |
| Tipo                          | Aço de cementação         |
| Tratamento                    | endurecido por cementação |
| Resistência à ruptura (N/mm²) | [Rm] 871.00               |

|  |         |        |
|--|---------|--------|
| Limite de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )            | [Re]    | 617.00 |
| Profundidade da ranhura do eixo (valor mínimo) (mm)    | [t1]    | 11.00  |
| Chanfro no eixo (mm)                                   | [s1]    | 0.01   |
| Comprimento de apoio de chaveta (mm)                   | [ltr]   | 80.00  |
| Altura de chaveta de apoio (mm)                        | [t1tr]  | 8.13   |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                | [peq]   | 345.94 |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                | [pmax]  | 345.94 |
| Fator de suporte                                       | [fs]    | 1.30   |
| Fator de influência de endurecimento                   | [fH]    | 1.15   |
| Compressão superficial admissível (N/mm <sup>2</sup> ) | [pzul]  | 922.41 |
| Fator de frequência de picos de carga                  | [fL]    | 1.40   |
| Fator de mudança de sentido de carga                   | [fw]    | 1.00   |
| Segurança contra fluência (fw * pzul peq)              | [SFeq]  | 2.67   |
| Segurança contra fluência (fL * pzul/pmax)             | [SFmax] | 3.73   |
| Segurança mínima                                       | [SF]    | 2.67   |

### **Cubo**

|   |                            |
|---|----------------------------|
| Material (Entrada própria)                  | 36 CrNiMo 4 (2)            |
| Tipo  | Aço beneficiado            |
| Tratamento                                  | temperado à chama/por ind. |
| Resistência à ruptura (N/mm <sup>2</sup> )  | [Rm] 1100.00               |
| Limite de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> ) | [Re] 900.00                |

|  |         |         |
|--|---------|---------|
| Profundidade de ranhura de cubo (valor mínimo) (mm)    | [t2]    | 7.40    |
| Chanfro no cubo (mm)                                   | [s2]    | 0.01    |
| Comprimento de apoio de chaveta (mm)                   | [ltr]   | 80.00   |
| Altura de chaveta de apoio (mm)                        | [t2tr]  | 8.45    |
| Pequeno diâmetro externo de cubo (mm)                  | [D1]    | 180.00  |
| Grande diâmetro externo de cubo (mm)                   | [D2]    | 600.00  |
| Largura da peça do cubo com D2 (mm)                    | [c]     | 60.70   |
| Diâmetro de substituição cubo (mm)                     | [D]     | 255.23  |
| Distância a0 (Fig. 2, DIN 6892) (mm)                   | [a0]    | 40.00   |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                | [peq]   | 333.10  |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )                | [pmax]  | 333.10  |
| Fator de suporte                                       | [fs]    | 1.50    |
| Fator de influência de endurecimento                   | [fH]    | 1.15    |
| Compressão superficial admissível (N/mm <sup>2</sup> ) | [pzul]  | 1552.50 |
| Fator de frequência de picos de carga                  | [fL]    | 1.40    |
| Fator de mudança de sentido de carga                   | [fw]    | 1.00    |
| Segurança contra fluência (fw * pzul peq)              | [SFeq]  | 4.66    |
| Segurança contra fluência (fL * pzul/pmax)             | [SFmax] | 6.53    |
| Segurança mínima                                       | [SF]    | 4.66    |

### **Chaveta**

|   |                          |
|---|--------------------------|
| Material                                    | C60                      |
| Tipo  | Aço beneficiado          |
| Tratamento                                  | sem liga, beneficiado    |
| Resistência à ruptura (N/mm <sup>2</sup> )  | [Rm] 800.00 (d=16- 40mm) |
| Limite de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> ) | [Re] 520.00 (d=16- 40mm) |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )     | [peq] 345.94 / 333.10    |
| Esforço de pressão (N/mm <sup>2</sup> )     | [pmax] 345.94 / 333.10   |
| Fator de suporte                            | [fs] 1.10                |

|  |         |         |
|--|---------|---------|
| Fator de influência de endurecimento                   | [fH]    | 1.00    |
| Compressão superficial admissível (N/mm <sup>2</sup> ) | [pzul]  | 572.00  |
| Fator de frequência de picos de carga                  | [fL]    | 1.40    |
| Fator de mudança de sentido de carga                   | [fw]    | 1.00    |
| Segurança contra fluência (fw * pzul peq)              | [SFeq]  | 1.65    |
| Segurança contra fluência (fL * pzul/pmax)             | [SFmax] | 2.31    |
| Segurança mínima                                       | [SF]    | 1.65    |
|  |         |         |
| Superfície de seção transversal (mm <sup>2</sup> )     | [b*ltr] | 2560.00 |
| Esforço de cisalhamento (N/mm <sup>2</sup> )           | [tau]   | 82.00   |

Observações:

Segurança = Mínimo (fw\*pzul/peq, fL\*pzul/pmax)

Condição em conformidade com a norma DIN 6892 Segurança >= 1,0

Chanfro na chaveta Valor médio em conformidade com os exemplos da norma DIN 6892

Profundidade da ranhura: Valor mínimo em conformidade com os exemplos da norma DIN 6892

---

Fim do Relatório

linhas: 133

---

## Veio D (Veio de saída)

KISSsoft Release 03/2017 F

KISSsoft University license - Universidade do Porto

### Arquivo

Nome : Mauro Filipe Rodrigues Domingues

Modificado por: up201404793

Data: Junho de 2019

Hora: -

## Cálculo de veios, eixos e suportes

### Dados de entrada

Sistema de coordenadas de eixo: ver Fig. W-002

|   |               |
|---|---------------|
| Designação  | Veio D        |
| Desenho   |               |
| Posição de partida (mm)   | 0.000         |
| Comprimento (mm)  | 391.000       |
| Velocidade (1/min)  | 60.33         |
| Sentido de rotação: dos ponteiros do relógio                          |               |
| Material (Entrada própria)  | 42 CrMo 4 (1) |
| Módulo de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )                           | 206000.000    |
| Número de Poisson nu  | 0.300         |
| Densidade (kg/m <sup>3</sup> )  | 7830.000      |
| Coeficiente de dilatação térmica (10 <sup>-6</sup> /K)                | 11.500        |
| Temperatura (°C)  | 20.000        |
| Peso do eixo (kg)   | 66.143        |
| (Observação: Peso válido para o eixo sem ter em conta as engrenagens) |               |
| Peso do eixo, incluindo massas adicionais (kg)                        | 368.175       |
| Momento de inércia de massa (kg*m <sup>2</sup> )                      | 18.469        |
| Momento de inércia GD2 (Nm <sup>2</sup> )                             | 724.705       |
| Peso no sentido ( 0.000, 0.000, -1.000)                               |               |
| Engrenagens consideradas como massas                                  |               |
| Deformações por cisalhamento são tidas em conta                       |               |
| Fator de correção de cisalhamento                                     | 1.100         |
| O ângulo de pressão de mancais de rolamento é tido em conta           |               |
| Zona de tolerância: Valor médio                                       |               |
| Temperatura de referência (°C)  | 20.000        |



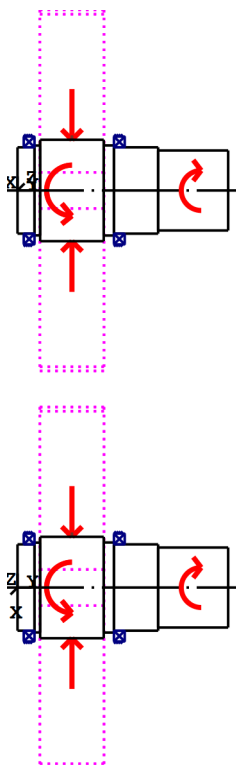


Figura: Aplicações da carga

## Definição do eixo Veio D

### Contorno externo

|                  |      |          |             |          |
|------------------|------|----------|-------------|----------|
| Cilindro (cil1)  |      |          | 0.000mm ... | 31.500mm |
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 160.0000 |             |          |
| Comprimento (mm) | [l]  | 31.5000  |             |          |
| Rugosidade (µm)  | [Rz] | 8.0000   |             |          |

Chanfro esquerda (Chanfro esquerda)

l=2.00 (mm), alpha=45.00 (°)

Entalhe direita (Entalhe direita)

r=1.00 (mm), t=0.60 (mm), l=6.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

Entrada própria, Forma B, FKM

Entalhe retangular (Entalhe retangular)

b=4.15 (mm), t=2.50 (mm), r=0.25 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

|                  |      |          |              |          |
|------------------|------|----------|--------------|----------|
| Cilindro (cil2)  |      |          | 31.500mm ... | 42.000mm |
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 166.5000 |              |          |
| Comprimento (mm) | [l]  | 10.5000  |              |          |
| Rugosidade (µm)  | [Rz] | 8.0000   |              |          |

Raio direita (Raio direita)

r=1.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

Cilindro (cil3) 42.000mm ... 160.000mm

|                  |      |          |
|------------------|------|----------|
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 188.0000 |
| Comprimento (mm) | [l]  | 118.0000 |
| Rugosidade (µm)  | [Rz] | 8.0000   |

Eixo dentado/ estriado (Eixo dentado/ estriado) -17.000mm ... 101.000mm  
da=188.00 (mm), df=167.00 (mm), z=17, mn=10.00 (mm), l=118.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

Cilindro (cil4) 160.000mm ... 179.000mm

|                  |      |          |
|------------------|------|----------|
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 167.0000 |
| Comprimento (mm) | [l]  | 19.0000  |
| Rugosidade (µm)  | [Rz] | 8.0000   |

Raio esquerda (Raio esquerda)  
r=1.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

Cilindro (cil5) 179.000mm ... 261.000mm

|                  |      |          |
|------------------|------|----------|
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 160.0000 |
| Comprimento (mm) | [l]  | 82.0000  |
| Rugosidade (µm)  | [Rz] | 8.0000   |

Entalhe esquerda (Entalhe esquerda)  
r=1.00 (mm), t=0.40 (mm), l=6.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)  
Entrada própria, Forma B, FKM

Entalhe retangular (Entalhe retangular)  
b=4.15 (mm), t=2.50 (mm), r=0.25 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

Cilindro (cil6) 261.000mm ... 391.000mm

|                  |      |          |
|------------------|------|----------|
| Diâmetro (mm)    | [d]  | 148.2800 |
| Comprimento (mm) | [l]  | 130.0000 |
| Rugosidade (µm)  | [Rz] | 8.0000   |

Chanfro direita (Chanfro direita)  
l=2.00 (mm), alpha=45.00 (°)

Eixo dentado/ estriado (Eixo dentado/ estriado) 241.000mm ... 341.000mm  
da=148.40 (mm), df=131.60 (mm), z=17, mn=8.00 (mm), l=100.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

Raio esquerda (Raio esquerda)  
r=2.00 (mm), Rz=8.0, Rodado (Ra=3.2µm/125µin)

## Forças

Tipo do elemento de força

**Acoplamento/motor**

Designação no modelo

Coupling2(Boundary2)

Posição no eixo (mm) [ylocal]

341.0000

Posição no sistema global (mm) [yglobal]

341.0000

Diâmetro efetivo (mm)

140.0000

Fator força radial (-)

0.0000

Direção da força radial (°)

0.0000

Fator força axial (-)

0.0000

Comprimento da aplicação da força (mm)

100.0000

|   |             |                   |
|---|-------------|-------------------|
| Potência (kW)                           | 375.0000    | acionante (saída) |
| Torque (Nm)                             | -59361.3339 |                   |
| Força axial (N)                         | 0.0000      |                   |
| Força transversal X (N)                 | 0.0000      |                   |
| Força transversal Z (N)                 | 0.0000      |                   |
| Momento fletor X (Nm)                   | 0.0000      |                   |
| Momento fletor Z (Nm)                   | 0.0000      |                   |
| Massas (kg)                             | 0.0000      |                   |
| Momento de inércia de massa Jp (kg*m²)  | 0.0000      |                   |
| Momento de inércia de massa Jxx (kg*m²) | 0.0000      |                   |
| Momento de inércia de massa Jzz (kg*m²) | 0.0000      |                   |
| Excentricidade (mm)                     | 0.0000      |                   |

|  |           |   |
|--|-----------|---|
| Tipo do elemento de força  |           | <b>Engrenagem cilíndrica</b>              |
| Designação no modelo   |           | z6 (engrenamento z3/z6)                   |
| Posição no eixo (mm)   | [ylocal]  | 101.0000                                  |
| Posição no sistema global (mm)                                     | [yglobal] | 101.0000                                  |
| Diâmetro primitivo de funcionamento (mm)                           |           | 669.0642                                  |
| Ângulo oblíquo (°)   |           | 25.1594 Helicoidal dupla direita-esquerda |
| Ângulo de pressãoÂngulo de pressão de operação na seção normal (°) |           | 20.9130                                   |
| Posição do contato (°)   |           | 180.0000                                  |
| Comprimento da aplicação da força (mm)                             |           | 119.1000                                  |
| Potência (kW)  |           | 187.5000 acionado (entrada)               |
| Torque (Nm)  |           | 29680.6669                                |
| Força axial (N)  |           | 0.0000                                    |
| Força transversal X (N)  |           | 37456.6761                                |
| Força transversal Z (N)  |           | 88722.9227                                |
| Momento fletor X (Nm)  |           | 0.0000                                    |
| Momento fletor Z (Nm)  |           | 0.0000                                    |

|  |           |   |
|--|-----------|---|
| Tipo do elemento de força  |           | <b>Engrenagem cilíndrica</b>              |
| Designação no modelo   |           | z6 (engrenamento z5/z6)                   |
| Posição no eixo (mm)   | [ylocal]  | 101.0000                                  |
| Posição no sistema global (mm)                                     | [yglobal] | 101.0000                                  |
| Diâmetro primitivo de funcionamento (mm)                           |           | 669.0642                                  |
| Ângulo oblíquo (°)   |           | 25.1594 Helicoidal dupla direita-esquerda |
| Ângulo de pressãoÂngulo de pressão de operação na seção normal (°) |           | 20.9130                                   |
| Posição do contato (°)   |           | 0.0000                                    |
| Comprimento da aplicação da força (mm)                             |           | 119.1000                                  |
| Potência (kW)  |           | 187.5000 acionado (entrada)               |
| Torque (Nm)  |           | 29680.6669                                |
| Força axial (N)  |           | 0.0000                                    |
| Força transversal X (N)  |           | -37456.6761                               |
| Força transversal Z (N)  |           | -88722.9227                               |
| Momento fletor X (Nm)  |           | 0.0000                                    |
| Momento fletor Z (Nm)  |           | 0.0000                                    |

## Mancal

|                        |           |                                   |
|------------------------|-----------|-----------------------------------|
| Designação no modelo   |           | Rol 7                             |
| Tipo de mancal         |           | Koyo 6832                         |
| Design do mancal       |           | Rolamento de esferas (fila única) |
| Posição do mancal (mm) | [ylocal]  | 21.500                            |
| Posição do mancal (mm) | [yglobal] | 21.500                            |

|   |                       |             |
|---|-----------------------|-------------|
| Fixação do anel externo                     |                       | Mancal fixo |
| Diâmetro interno (mm)                       | [d]                   | 160.000     |
| Diâmetro externo (mm)                       | [D]                   | 200.000     |
| Largura (mm)                                | [b]                   | 20.000      |
| Raio de canto (mm)                          | [r]                   | 1.100       |
| Classificação da carga estática (kN)        | [C <sub>0</sub> ]     | 56.900      |
| Classificação da carga dinâmica básica (kN) |                       |             |
|   | [C]                   | 60.500      |
| Classificação de carga fadiga (kN)          | [C <sub>u</sub> ]     | 2.200       |
| Valores para a geometria aproximada:        |                       |             |
| Classificação da carga dinâmica básica (kN) |                       |             |
|   | [C <sub>theo</sub> ]  | 0.000       |
| Classificação da carga estática (kN)        | [C <sub>0theo</sub> ] | 0.000       |

|                      |                                   |
|----------------------|-----------------------------------|
| Designação no modelo | Rol 8                             |
| Tipo de mancal       | Koyo 6832                         |
| Design do mancal     | Rolamento de esferas (fila única) |

|   |                        |             |
|---|------------------------|-------------|
| Posição do mancal (mm)                      | [y <sub>lokal</sub> ]  | 189.000     |
| Posição do mancal (mm)                      | [y <sub>global</sub> ] | 189.000     |
| Fixação do anel externo                     |                        | Mancal fixo |
| Diâmetro interno (mm)                       | [d]                    | 160.000     |
| Diâmetro externo (mm)                       | [D]                    | 200.000     |
| Largura (mm)                                | [b]                    | 20.000      |
| Raio de canto (mm)                          | [r]                    | 1.100       |
| Classificação da carga estática (kN)        | [C <sub>0</sub> ]      | 56.900      |
| Classificação da carga dinâmica básica (kN) |                        |             |
|   | [C]                    | 60.500      |
| Classificação de carga fadiga (kN)          | [C <sub>u</sub> ]      | 2.200       |
| Valores para a geometria aproximada:        |                        |             |
| Classificação da carga dinâmica básica (kN) |                        |             |
|   | [C <sub>theo</sub> ]   | 0.000       |
| Classificação da carga estática (kN)        | [C <sub>0theo</sub> ]  | 0.000       |

-----

Eixo 'Shaft4': A massa do seguinte elemento é tida em conta (y= 41.7250 (mm)): Engrenagem cilíndrica 'z6(GearPair\_const3)'  
m (yS= 41.7250 (mm)): 1.4203 (kg)  
Jp: 0.0844 (kg\*m²), Jxx: 0.0422 (kg\*m²), Jzz: 0.0422 (kg\*m²)

-----

Eixo 'Shaft4': A massa do seguinte elemento é tida em conta (y= 101.0000 (mm)): Engrenagem cilíndrica 'z6(GearPair\_const3)'  
m (yS= 101.0000 (mm)): 299.1921 (kg)  
Jp: 18.0634 (kg\*m²), Jxx: 9.3789 (kg\*m²), Jzz: 9.3789 (kg\*m²)

-----

Eixo 'Shaft4': A massa do seguinte elemento é tida em conta (y= 160.2750 (mm)): Engrenagem cilíndrica 'z6(GearPair\_const3)'  
m (yS= 160.2750 (mm)): 1.4198 (kg)  
Jp: 0.0844 (kg\*m²), Jxx: 0.0422 (kg\*m²), Jzz: 0.0422 (kg\*m²)

## Resultados

### Eixo

|                         |         |
|-------------------------|---------|
| Deflexão máxima (µm)    | 17.841  |
| Posição do máximo (mm)  | 101.000 |
| Centro de massa (mm)    | 179.265 |
| Soma da carga axial (N) | 0.000   |
| Torção sob torque (°)   | -0.158  |

### Mancal

|  |                            |       |    |
|--|----------------------------|-------|----|
| Probabilidade de falha   | [n]                        | 10.00 | %  |
| Folga axial  | [u <sub>A</sub> ]          | 10.00 | µm |
| Lubrificante   | Óleo: Klübersynth EG 4-150 |       |    |
| Lubrificante com aditivos, cujo efeito foi avaliado em mancais de rolamento.       |                            |       |    |
| Lubrificação de óleo sem filtragem o com filtro de fluxo paralelo, ISO4406 -/19/16 |                            |       |    |
| Lubrificante - Temperatura de funcionamento  | [T <sub>B</sub> ]          | 60.00 | °C |
| Valor-limite para fator aISO   | [aISO <sub>max</sub> ]     | 50.00 |    |
| Nível do óleo  | [h <sub>oil</sub> ]        | 0.00  | mm |
| Lubrificação por imersão em óleo   |                            |       |    |

Mancal de rolamento clássico (considerar ângulo de pressão)

### Eixo 'Veio D' Mancal de rolamento 'Rol 7'

|  |                      |           |                    |
|--|----------------------|-----------|--------------------|
| Posição (coordenada Y)   | [y]                  | 21.50     | mm                 |
| carga dinamicamente equivalente  | [P]                  | 1.59      | kN                 |
| Carga equivalente  | [P <sub>0</sub> ]    | 1.59      | kN                 |
| Fator para probabilidade de falha  | [a <sub>1</sub> ]    | 1.000     |                    |
| Fator modificador de vida  | [aISO]               | 0.579     |                    |
| Vida útil nominal rolamento  | [L <sub>nh</sub> ]   | > 1000000 | h                  |
| Vida útil modificada rolamento   | [L <sub>nmh</sub> ]  | > 1000000 | h                  |
| Viscosidade operacional  | [v]                  | 62.57     | mm <sup>2</sup> /s |
| Fator de segurança estático  | [S <sub>0</sub> ]    | 35.71     |                    |
| Força de reação do mancal  | [F <sub>x</sub> ]    | -0.000    | kN                 |
| Força de reação do mancal  | [F <sub>y</sub> ]    | 0.000     | kN                 |
| Força de reação do mancal  | [F <sub>z</sub> ]    | 1.594     | kN                 |
| Força de reação do mancal  | [F <sub>r</sub> ]    | 1.594     | kN (90°)           |
| Nível do óleo  | [H]                  | 0.000     | mm                 |
| Torque de atrito independentemente da carga[M <sub>0</sub> ]                             |                      | 0.240     | Nm                 |
| Torque de atrito dependendo da carga [M <sub>1</sub> ]                                   |                      | 0.034     | Nm                 |
| Torque de atrito rolamento de rolos cilíndricos[M <sub>2</sub> ]                         |                      | 0.000     | Nm                 |
| Torque de atrito vedações conforme especificado no catálogo principal 4000/IV T DE: 1994 |                      |           |                    |
| Torque de fricção  | [M <sub>loss</sub> ] | 0.274     | Nm                 |
| Potência dissipada   | [P <sub>loss</sub> ] | 1.731     | W                  |

O torque de atrito é calculado em conformidade com as indicações do catálogo SKF de 1994.

Os fatores para o cálculo do torque de fricção foram assumidos para este mancal.

|                        |                   |         |           |
|------------------------|-------------------|---------|-----------|
| Deslocamento do mancal | [u <sub>x</sub> ] | 0.000   | µm        |
| Deslocamento do mancal | [u <sub>y</sub> ] | -0.000  | µm        |
| Deslocamento do mancal | [u <sub>z</sub> ] | -17.750 | µm        |
| Deslocamento do mancal | [u <sub>r</sub> ] | 17.750  | µm (-90°) |
| Inclinação do mancal   | [r <sub>x</sub> ] | -0.000  | mrاد (0°) |
| Inclinação do mancal   | [r <sub>y</sub> ] | -0.000  | mrاد (0°) |
| Inclinação do mancal   | [r <sub>z</sub> ] | -0.000  | mrاد (0°) |

Inclinação do mancal [r] 0.000 mrad (0')

**Eixo 'Veio D' Mancal de rolamento 'Rol 8'**

|  |                      |           |                    |
|--|----------------------|-----------|--------------------|
| Posição (coordenada Y)   | [y]                  | 189.00    | mm                 |
| carga dinamicamente equivalente  | [P]                  | 2.01      | kN                 |
| Carga equivalente  | [P <sub>0</sub> ]    | 2.01      | kN                 |
| Fator para probabilidade de falha  | [a <sub>1</sub> ]    | 1.000     |                    |
| Fator modificador de vida  | [a <sub>ISO</sub> ]  | 0.502     |                    |
| Vida útil nominal rolamento  | [L <sub>nh</sub> ]   | > 1000000 | h                  |
| Vida útil modificada rolamento   | [L <sub>nmh</sub> ]  | > 1000000 | h                  |
| Viscosidade operacional  | [v]                  | 62.57     | mm <sup>2</sup> /s |
| Fator de segurança estático  | [S <sub>0</sub> ]    | 28.33     |                    |
| Força de reação do mancal  | [F <sub>x</sub> ]    | -0.000    | kN                 |
| Força de reação do mancal  | [F <sub>y</sub> ]    | 0.000     | kN                 |
| Força de reação do mancal  | [F <sub>z</sub> ]    | 2.009     | kN                 |
| Força de reação do mancal  | [F <sub>r</sub> ]    | 2.009     | kN (90°)           |
| Nível do óleo  | [H]                  | 0.000     | mm                 |
| Torque de atrito independentemente da carga  | [M <sub>0</sub> ]    | 0.240     | Nm                 |
| Torque de atrito dependendo da carga   | [M <sub>1</sub> ]    | 0.048     | Nm                 |
| Torque de atrito rolamento de rolos cilíndricos  | [M <sub>2</sub> ]    | 0.000     | Nm                 |
| Torque de atrito vedações conforme especificado no catálogo principal 4000/IV T DE: 1994 |                      |           |                    |
| Torque de fricção  | [M <sub>loss</sub> ] | 0.288     | Nm                 |
| Potência dissipada   | [P <sub>loss</sub> ] | 1.819     | W                  |

O torque de atrito é calculado em conformidade com as indicações do catálogo SKF de 1994.

Os fatores para o cálculo do torque de fricção foram assumidos para este mancal.

|                        |                   |         |               |
|------------------------|-------------------|---------|---------------|
| Deslocamento do mancal | [u <sub>x</sub> ] | 0.000   | µm            |
| Deslocamento do mancal | [u <sub>y</sub> ] | 0.000   | µm            |
| Deslocamento do mancal | [u <sub>z</sub> ] | -17.750 | µm            |
| Deslocamento do mancal | [u <sub>r</sub> ] | 17.750  | µm (-90°)     |
| Inclinação do mancal   | [r <sub>x</sub> ] | 0.000   | mrاد (0')     |
| Inclinação do mancal   | [r <sub>y</sub> ] | -0.663  | mrاد (-2.28') |
| Inclinação do mancal   | [r <sub>z</sub> ] | 0.000   | mrاد (0')     |
| Inclinação do mancal   | [r <sub>r</sub> ] | 0.000   | mrاد (0')     |

Dano (%) [Lreq] ( 20000.000)

|                   |      |      |
|-------------------|------|------|
| Condição de carga | B1   | B2   |
| 1                 | 2.00 | 2.00 |

Σ 2.00 2.00

Utilização (%) [Lreq] ( 20000.000)

|       |       |
|-------|-------|
| B1    | B2    |
| 27.14 | 27.14 |

Indicação: Utilização = (Lreq/Lh)^(1/k)

Rolamento de esferas: k = 3, mancal de rolamento: k = 10/3

B1: Roller Bearing7  
B2: Roller Bearing8

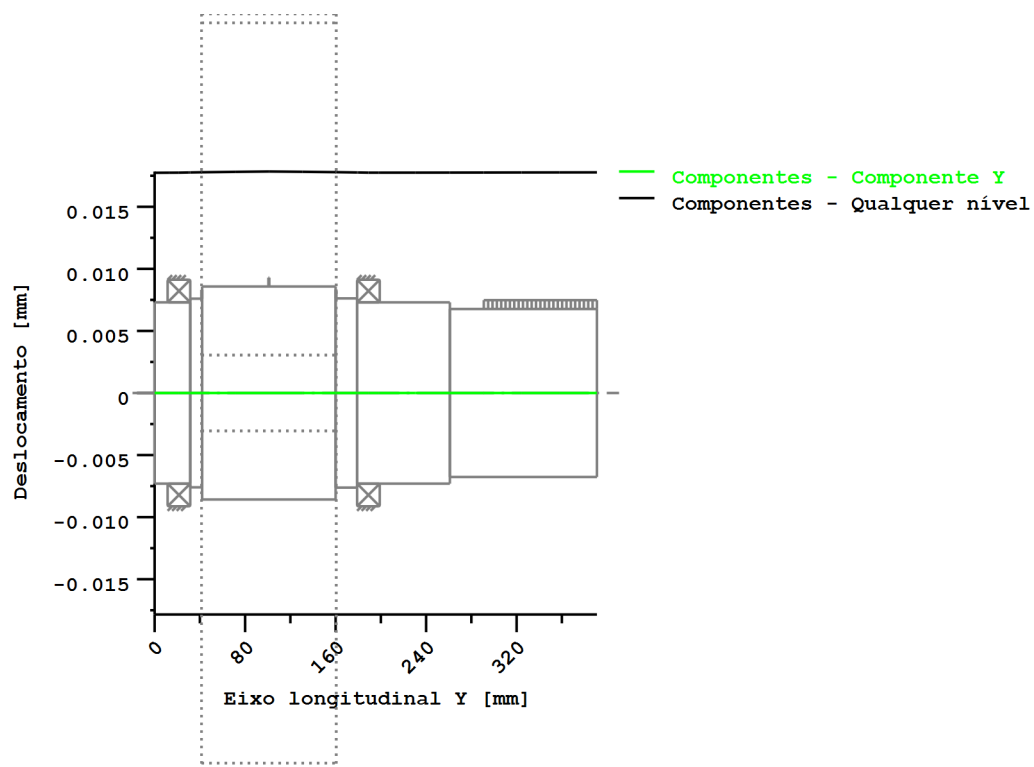
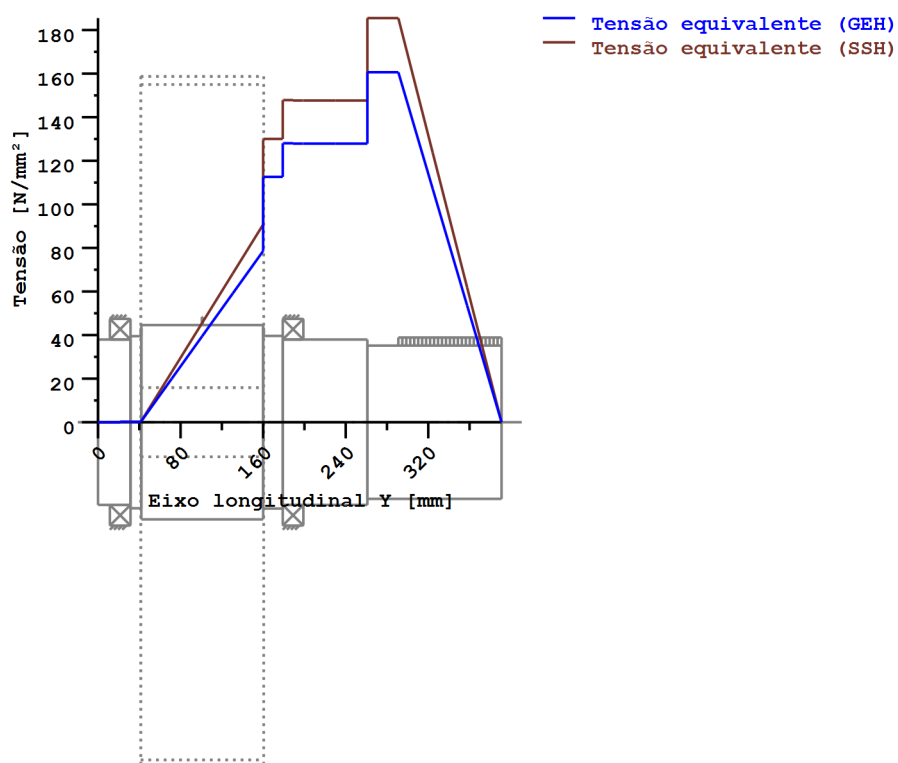


Figura: Deformação (linhas de flexão, etc.) (Qualquer nível 270 121)



Tensões nominais, sem ter em conta as concentrações de tensão  
 GEH(von Mises):  $\sigma_V = ((\sigma_B + \sigma_Z, D)^2 + 3 * (\tau_T + \tau_S)^2)^{1/2}$   
 SSH(Tresca):  $\sigma_V = ((\sigma_B - \sigma_Z, D)^2 + 4 * (\tau_T + \tau_S)^2)^{1/2}$

Figura: Tensão equivalente

**Cálculo da resistência em conformidade com DIN 743:2012  
com fadiga a baixo número de ciclos análoga à diretriz FKM e ao projeto FVA**

**Resumo**

**Veio D**

|                           |                       |
|---------------------------|-----------------------|
| Material                  | 42 CrMo 4 (1)         |
| Tipo de material          | Aço beneficiado       |
| Tratamento do material    | com liga, beneficiado |
| Tratamento de superfícies | Nenhum                |

Cálculo da fadiga a baixo número de ciclos e da resistência estática

Cálculo para caso de esforço 2 ( $\sigma_{av}/\sigma_{mv} = \text{const}$ )

| Seção transversal | Posição (coord Y) (mm) |                        |
|-------------------|------------------------|------------------------|
| A-A               | 199.44                 | Entalhe retangular     |
| B-B               | 291.01                 | Eixo dentado/ estriado |
| C-C               | 261.00                 | Ressalto do eixo       |
| D-D               | 160.00                 | Ressalto do eixo       |

Resultados:

| Seção transversal | Kfb  | Kfs  | K2d  | SD   | SS   |
|-------------------|------|------|------|------|------|
| A-A               | 3.67 | 1.06 | 0.80 | 1.51 | 2.51 |
| B-B               | 1.14 | 1.00 | 0.80 | 1.79 | 1.54 |
| C-C               | 2.37 | 0.89 | 0.80 | 1.95 | 2.20 |
| D-D               | 3.29 | 0.89 | 0.80 | 2.23 | 3.15 |

|                      |      |      |
|----------------------|------|------|
| Seguranças nominais: | 1.20 | 1.20 |
|----------------------|------|------|

Abreviaturas:

Kfb: Fator de entalhe flexão

Kfs: Fator de superfície

K2d: fator dimensional flexão

SD: Segurança resistência à fadiga

SS: Segurança limite de elasticidade

**Vida útil e dano**

|                                   |        |            |
|-----------------------------------|--------|------------|
| Tempo de vida útil do sistema (h) | [Hatt] | 1000000.00 |
|-----------------------------------|--------|------------|

|                     |     |      |
|---------------------|-----|------|
| Dano do sistema (%) | [D] | 0.00 |
|---------------------|-----|------|

|          |                  |
|----------|------------------|
| Dano (%) | [H] ( 20000.0 h) |
|----------|------------------|

Cálculo da confiabilidade R(t) com distribuição Weibull; t em (h):

$$R(t) = 100 * \text{Exp}(-((t^{\text{fac}} - t_0)/(T - t_0))^b) \%$$

| Welle | fac  | b   | t0         | T      |
|-------|------|-----|------------|--------|
| 1     | 3620 | 1.5 | 3.301e+009 | 7e+009 |

|                               |     |      |
|-------------------------------|-----|------|
| Dano da seção transversal (%) | [D] |      |
| A-A:                          |     | 0.00 |
| B-B:                          |     | 0.00 |
| C-C:                          |     | 0.00 |
| D-D:                          |     | 0.00 |



**Utilização (%) [Smin/S]**

| Seção transversal     | Estática | Resistente à fadiga |
|-----------------------|----------|---------------------|
| A-A                   | 47.810   | 79.479              |
| B-B                   | 78.109   | 67.180              |
| C-C                   | 54.609   | 61.486              |
| D-D                   | 38.050   | 53.818              |
| Utilização máxima (%) | [A]      | 79.479              |

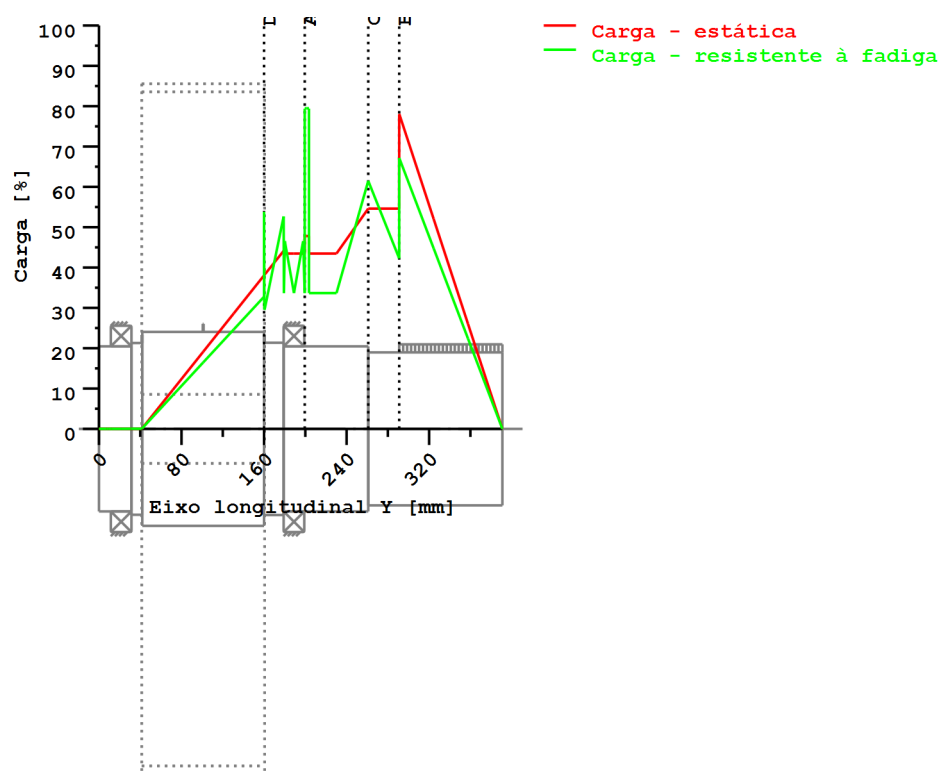


Figura: Resistência

## Detalhes de cálculo

### Indicações gerais

|                    |        |  |        |
|--------------------|--------|--|--------|
| Designação         | Veio D |  |        |
| Desenho            |        |  |        |
| Comprimento (mm)   | [l]    |  | 391.00 |
| Velocidade (1/min) | [n]    |  | 60.33  |

|                           |                       |
|---------------------------|-----------------------|
| Material                  | 42 CrMo 4 (1)         |
| Tipo de material          | Aço beneficiado       |
| Tratamento do material    | com liga, beneficiado |
| Tratamento de superfícies | Nenhum                |

|                                     | Tração/pressão | Flexão | Torção | Cisalhamento |
|-------------------------------------|----------------|--------|--------|--------------|
| Fator de carga cálculo estático     | 1.700          | 1.700  | 1.700  | 1.700        |
| Fator de carga resistência à fadiga | 1.000          | 1.000  | 1.000  | 1.000        |

Resistência à ruptura de unidade de controle (D= 190.00 mm) (N/mm<sup>2</sup>) [Rm d= 190.00] 750.00

Limite de elasticidade Unidade de controle (D= 190.00 mm) (N/mm<sup>2</sup>) [Rp d= 190.00] 500.00

|   |                  |
|---|------------------|
| [σ <sub>zdW</sub> ] (bei dB) (N/mm <sup>2</sup> ) | 300.00           |
| [σ <sub>bW</sub> ] (bei dB) (N/mm <sup>2</sup> )  | 375.00           |
| [τ <sub>tW</sub> ] (bei dB) (N/mm <sup>2</sup> )  | 210.00           |
| Espessura matéria-prima (mm)                      | [dWerkst] 190.00 |

Dados do material (σ<sub>Beff</sub>, σ<sub>Seff</sub>) em conformidade com as normas do material

Resistência a alternância calculada com K1(d), em conformidade com a norma DIN 743/3

Fator geométrico de dimensões K1d calculado com diâmetro de eixo D

Valores de resistência de material determinados a partir do diâmetro do eixo

(Requisito: melhoramento do eixo torneado)

Indicação: Os seguintes valores de materiais são válidos só exatamente para a primeira seção transversal; os outros são determinados de acordo com o respectivo "Diâmetro para fator dimensional".

|                  |        |
|------------------|--------|
| [σBeff] (N/mm²)  | 750.00 |
| [σSeff] (N/mm²)  | 500.00 |
| [σbF] (N/mm²)    | 600.00 |
| [τtF] (N/mm²)    | 346.41 |
| [σBRand] (N/mm²) | 708.00 |
| [σzdW] (N/mm²)   | 300.00 |
| [σbW] (N/mm²)    | 375.00 |
| [τtW] (N/mm²)    | 210.00 |

Fadiga a baixo número de ciclos para solicitação de nível único

|  |        |          |
|--|--------|----------|
| Vida útil nominal  | [H]    | 20000.00 |
| Número de ciclos de carga (Mio)                          | [NL]   | 72.390   |
| Dados da linha "Wöhler" semelhantes aos da diretiva FKM: |        |          |
| [kσ, kτ]   | 5      | 8        |
| [kDσ, kDτ]   | 0      | 0        |
| [NDσ, NDτ]   | 1e+006 | 1e+006   |
| [NDσII, NDτII]   | 0      | 0        |

Cálculo para caso de esforço 2 ( $\sigma_{av}/\sigma_{mv} = \text{const}$ )

### Seção transversal 'A-A' Entalhe retangular

|                                      |                      |      |                    |         |
|--------------------------------------|----------------------|------|--------------------|---------|
| Comentário                           | Y= 199.43...203.57mm |      |                    |         |
| Posição (coordenada Y) (mm)          | [y]                  |      |                    | 199.435 |
| Diâmetro externo (mm)                | [da]                 |      |                    | 160.000 |
| Diâmetro interno (mm)                | [di]                 |      |                    | 0.000   |
| Diâmetro para fator dimensional (mm) | [deff]               |      |                    | 160.000 |
| Efeito de entalhe                    |                      |      | Entalhe retangular |         |
| [d, r, t, m] (mm)                    | 155.00               | 0.25 | 2.50               | 4.15    |
| Rugosidade média (μm)                |                      | [Rz] |                    | 8.000   |

|  | Tração/pressão | Flexão   | Torção   | Cisalhamento |
|--|----------------|----------|----------|--------------|
| Carga: (N) (Nm)                                  |                |          |          |              |
| Valor médio                                      |                |          |          |              |
| [Fzdm, Mbm, Tm, Fqm]                             | 0.0            | 0.0      | 29680.7  | 0.0          |
| Deflexão (amplitude) [Fzda, Mba, Ta, Fqa]        | 0.0            | 24.7     | 29680.7  | 267.5        |
| Valor máximo [Fzdmax, Mbmax, Tmax, Fqmax]        | 0.0            | 42.1     | 100914.3 | 454.7        |
| Seção transversal, torques de resistência: (mm²) |                |          |          |              |
| [A, Wb, Wt, A]                                   | 18869.2        | 365590.6 | 731181.1 | 18869.2      |

|                                      |       |       |         |       |
|--------------------------------------|-------|-------|---------|-------|
| Tensões: (N/mm²)                     |       |       |         |       |
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm²)         | 0.000 | 0.000 | 40.593  | 0.000 |
| [σzda, σba, τa, τqa] (N/mm²)         | 0.000 | 0.068 | 40.593  | 0.019 |
| [σzdmax, σbmax, τmax, τqmax] (N/mm²) | 0.000 | 0.115 | 138.015 | 0.032 |

|                                |          |       |
|--------------------------------|----------|-------|
| Efeito tecnológico de tamanhos | [K1(σB)] | 1.000 |
|                                | [K1(σS)] | 1.000 |

|  | Tração/pressão | Flexão | Torção |
|--|----------------|--------|--------|
| Coeficiente de efeito de entalhe             | [β(dB)]        | 3.761  | 3.443  |
| [dB] (mm) = 30.0                             |                |        | 2.500  |
| Efeito geométrico de tamanhos                | [K3(d)]        | 0.885  | 0.893  |
| Efeito geométrico de tamanhos                | [K3(dB)]       | 0.947  | 0.950  |
| Coeficiente de efeito de entalhe             | [β]            | 4.024  | 3.666  |
| Efeito geométrico de tamanhos                | [K2(d)]        | 1.000  | 0.800  |
| Fator de influência rugosidade da superfície | [KF]           | 1.060  | 1.060  |
| Fator de endurecimento da superfície         | [KV]           | 1.000  | 1.000  |
| Fator de influência total                    | [K]            | 3.967  | 4.525  |
|  |                |        | 3.239  |

Nível de segurança disponível para a verificação de resistência permanente:

|                                  |       |        |
|----------------------------------|-------|--------|
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [σmV] | 70.309 |
| Tensão média equivalente (N/mm²) | [τmV] | 40.593 |

Resistência dos componentes a esforços alternados (N/mm²)

|   |         |        |        |        |
|---|---------|--------|--------|--------|
|   | [σWK]   | 75.615 | 82.869 | 64.830 |
| Fator de influência sens. média tensão. |         |        |        |        |
|   | [ψσK]   | 0.053  | 0.058  | 0.045  |
| Amplitude tolerável (N/mm²)             | [σADK]  | 0.008  | 0.664  | 62.028 |
| Amplitude tolerável (N/mm²)             | [σANK]  | 0.008  | 0.664  | 62.028 |
| Soma eficaz Miner                       | [DM]    | 0.300  | 0.300  | 0.300  |
| Fator de espectro                       | [fKoll] | 1.000  | 1.000  | 1.000  |

|   |          |         |         |         |
|---|----------|---------|---------|---------|
| Segurança contra fadiga   | [S]      | 1.510   |         |         |
| Segurança nominal contra fadiga   | [Smin]   | 1.200   |         |         |
| Resultado (%)   | [S/Smin] | 125.8   |         |         |
| Nível de segurança disponível para a verificação contra ultrapassagem do limite elástico: |          |         |         |         |
| Sensibilidade ao entalhe estática   | [K2F]    | 1.000   | 1.200   | 1.200   |
| Fator de aumento  | [yF]     | 1.150   | 1.150   | 1.000   |
| Limite de escoamento de componentes (N/mm <sup>2</sup> )                                  |          |         |         |         |
|   | [σFK]    | 575.000 | 690.000 | 346.410 |
| Segurança limite elástico   | [S]      |         | 2.510   |         |
| Segurança nominal   | [Smin]   |         | 1.200   |         |
| Resultado (%)   | [S/Smin] |         | 209.2   |         |

#### Seção transversal 'B-B' Eixo dentado/ estriado

|                                      |                      |                 |                        |       |
|--------------------------------------|----------------------|-----------------|------------------------|-------|
| Comentário                           | Y= 291.00...391.00mm |                 |                        |       |
| Posição (coordenada Y) (mm)          | [y]                  |                 | 291.010                |       |
| Diâmetro externo (mm)                | [da]                 |                 | 148.280                |       |
| Diâmetro interno (mm)                | [di]                 |                 | 0.000                  |       |
| Diâmetro para fator dimensional (mm) | [deff]               |                 | 148.280                |       |
| Efeito de entalhe                    |                      |                 | Eixo dentado/ estriado |       |
| ISO 4156:2005, DIN 5480:2005         |                      |                 |                        |       |
| [da, df, z, mn] (mm)                 |                      | 148.400 131.600 | 17                     | 8.000 |
| Rugosidade média (μm)                | [Rz]                 |                 |                        | 8.000 |

|   |  | Tração/pressão | Flexão   | Torção   | Cisalhamento |
|---|--|----------------|----------|----------|--------------|
| Carga: (N) (Nm)   |  |                |          |          |              |
| Valor médio   |  |                |          |          |              |
| [Fzdm, Mbm, Tm, Fqm]  |  | 0.0            | 0.0      | 29677.7  | 0.0          |
| Deflexão (amplitude) [Fzda, Mba, Ta, Fqa]                     |  | 0.0            | 6.6      | 29677.7  | 132.6        |
| Valor máximo [Fzdmax, Mbmax, Tmax, Fqmax]                     |  | 0.0            | 11.3     | 100904.2 | 225.4        |
| Seção transversal, torques de resistência: (mm <sup>2</sup> ) |  |                |          |          |              |
| [A, Wb, Wt, A]  |  | 13602.0        | 223752.3 | 447504.7 | 13602.0      |

|   |  |       |       |         |       |
|---|--|-------|-------|---------|-------|
| Tensões: (N/mm <sup>2</sup> )                     |  |       |       |         |       |
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm <sup>2</sup> )         |  | 0.000 | 0.000 | 66.318  | 0.000 |
| [σzda, σba, τa, τqa] (N/mm <sup>2</sup> )         |  | 0.000 | 0.030 | 66.318  | 0.013 |
| [σzdmax, σbmax, τmax, τqmax] (N/mm <sup>2</sup> ) |  | 0.000 | 0.050 | 225.482 | 0.022 |

|                                |          |       |  |  |  |
|--------------------------------|----------|-------|--|--|--|
| Efeito tecnológico de tamanhos | [K1(σB)] | 1.000 |  |  |  |
|                                | [K1(σS)] | 1.000 |  |  |  |

|  |          | Tração/pressão | Flexão | Torção |       |
|--|----------|----------------|--------|--------|-------|
| Coeficiente de efeito de entalhe   | [β(dB)]  | 1.131          | 1.131  | 1.200  |       |
| [dB] (mm) = 29.0   |          |                |        |        |       |
| Efeito geométrico de tamanhos  | [K3(d)]  | 0.989          | 0.989  | 0.984  |       |
| Efeito geométrico de tamanhos  | [K3(dB)] | 0.995          | 0.995  | 0.993  |       |
| Coeficiente de efeito de entalhe   | [β]      | 1.137          | 1.137  | 1.210  |       |
| Efeito geométrico de tamanhos  | [K2(d)]  | 1.000          | 0.801  | 0.801  |       |
| Fator de influência rugosidade da superfície   | [KF]     |                | 1.000  | 1.000  | 1.000 |
| O fator de rugosidade está incluído no coeficiente de efeito de entalhe, em conformidade com a norma |          |                |        |        |       |
| Fator de endurecimento da superfície   | [KV]     | 1.000          | 1.000  | 1.000  |       |
| Fator de influência total  | [K]      | 1.137          | 1.420  | 1.512  |       |

Nível de segurança disponível para a verificação de resistência permanente:

|   |       |         |  |  |
|---|-------|---------|--|--|
| Tensão média equivalente (N/mm <sup>2</sup> ) | [σmV] | 114.866 |  |  |
| Tensão média equivalente (N/mm <sup>2</sup> ) | [τmV] | 66.318  |  |  |

Resistência dos componentes a esforços alternados (N/mm<sup>2</sup>)

|  |         |         |         |         |  |
|--|---------|---------|---------|---------|--|
|  | [σWK]   | 263.801 | 264.055 | 138.933 |  |
| Fator de influência sens. média tensão.  |         |         |         |         |  |
|  | [ψσK]   | 0.213   | 0.214   | 0.102   |  |
| Amplitude tolerável (N/mm <sup>2</sup> ) | [σADK]  | 0.004   | 0.155   | 126.064 |  |
| Amplitude tolerável (N/mm <sup>2</sup> ) | [σANK]  | 0.004   | 0.155   | 126.064 |  |
| Soma eficaz Miner                        | [DM]    | 0.300   | 0.300   | 0.300   |  |
| Fator de espectro                        | [fKoll] | 1.000   | 1.000   | 1.000   |  |
| Segurança contra fadiga                  | [S]     |         | 1.786   |         |  |
| Segurança nominal contra fadiga          | [Smin]  |         | 1.200   |         |  |

|   |          |         |         |         |
|---|----------|---------|---------|---------|
| Resultado (%)   | [S/Smin] | 148.9   |         |         |
| Nível de segurança disponível para a verificação contra ultrapassagem do limite elástico: |          |         |         |         |
| Sensibilidade ao entalhe estática   | [K2F]    | 1.000   | 1.200   | 1.200   |
| Fator de aumento  | [yF]     | 1.000   | 1.000   | 1.000   |
| Limite de escoamento de componentes (N/mm <sup>2</sup> )                                  | [σFK]    | 500.000 | 600.000 | 346.410 |
| Segurança limite elástico   | [S]      |         | 1.536   |         |
| Segurança nominal   | [Smin]   |         | 1.200   |         |
| Resultado (%)   | [S/Smin] |         | 128.0   |         |

### Seção transversal 'C-C' Ressalto do eixo

|                                      |             |       |                  |  |
|--------------------------------------|-------------|-------|------------------|--|
| Comentário                           | Y= 261.00mm |       |                  |  |
| Posição (coordenada Y) (mm)          | [y]         |       | 261.000          |  |
| Diâmetro externo (mm)                | [da]        |       | 148.280          |  |
| Diâmetro interno (mm)                | [di]        |       | 0.000            |  |
| Diâmetro para fator dimensional (mm) | [deff]      |       | 160.000          |  |
| Efeito de entalhe                    |             |       | Ressalto do eixo |  |
| [D, r, t] (mm)                       | 160.000     | 2.000 | 5.860            |  |
| Rugosidade média (μm)                | [Rz]        |       | 8.000            |  |

|   |  |         |                |          |        |              |
|---|--|---------|----------------|----------|--------|--------------|
|   |  |         | Tração/pressão | Flexão   | Torção | Cisalhamento |
| Carga: (N) (Nm)   |  |         |                |          |        |              |
| Valor médio   |  |         |                |          |        |              |
| [Fzdm, Mbm, Tm, Fqm]  |  | 0.0     | 0.0            | 29680.7  |        | 0.0          |
| Deflexão (amplitude) [Fzda, Mba, Ta, Fqa]                     |  | 0.0     | 11.2           | 29680.7  |        | 172.4        |
| Valor máximo [Fzdmax, Mbmax, Tmax, Fqmax]                     |  | 0.0     | 19.1           | 100914.3 |        | 293.1        |
| Seção transversal, torques de resistência: (mm <sup>2</sup> ) |  |         |                |          |        |              |
| [A, Wb, Wt, A]  |  | 17268.5 | 320072.0       | 640143.9 |        | 17268.5      |

|   |  |       |       |         |       |
|---|--|-------|-------|---------|-------|
| Tensões: (N/mm <sup>2</sup> )                     |  |       |       |         |       |
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm <sup>2</sup> )         |  | 0.000 | 0.000 | 46.366  | 0.000 |
| [σzda, σba, τa, τqa] (N/mm <sup>2</sup> )         |  | 0.000 | 0.035 | 46.366  | 0.013 |
| [σzdmax, σbmax, τmax, τqmax] (N/mm <sup>2</sup> ) |  | 0.000 | 0.060 | 157.643 | 0.023 |

|                                |          |       |  |  |  |
|--------------------------------|----------|-------|--|--|--|
| Efeito tecnológico de tamanhos | [K1(σB)] | 1.000 |  |  |  |
|                                | [K1(σS)] | 1.000 |  |  |  |

|  |         |       |                |        |        |       |
|--|---------|-------|----------------|--------|--------|-------|
|  |         |       | Tração/pressão | Flexão | Torção |       |
| Coefficiente de forma                        | [a]     | 2.793 |                | 2.614  |        | 1.744 |
| Quebra de tensão relacionada                 | [G']    | 1.280 |                | 1.280  |        | 0.575 |
| Sensibilidade ao entalhe                     | [n]     | 1.105 |                | 1.105  |        | 1.070 |
| Coefficiente de efeito de entalhe            | [β]     | 2.527 |                | 2.365  |        | 1.629 |
| Efeito geométrico de tamanhos                | [K2(d)] | 1.000 |                | 0.801  |        | 0.801 |
| Fator de influência rugosidade da superfície | [KF]    |       | 0.886          |        | 0.886  | 0.934 |
| Fator de endurecimento da superfície         | [KV]    | 1.000 |                | 1.000  |        | 1.000 |
| Fator de influência total                    | [K]     | 2.656 |                | 3.083  |        | 2.104 |

|   |       |        |
|---|-------|--------|
| Nível de segurança disponível para a verificação de resistência permanente: |       |        |
| Tensão média equivalente (N/mm <sup>2</sup> )                               | [σmV] | 80.308 |
| Tensão média equivalente (N/mm <sup>2</sup> )                               | [τmV] | 46.366 |

|  |          |         |         |        |
|--|----------|---------|---------|--------|
| Resistência dos componentes a esforços alternados (N/mm <sup>2</sup> ) |          |         |         |        |
|  | [σWK]    | 112.956 | 121.653 | 99.797 |
| Fator de influência sens. média tensão.                                |          |         |         |        |
|  | [ψσK]    | 0.081   | 0.088   | 0.071  |
| Amplitude tolerável (N/mm <sup>2</sup> )                               | [σADK]   | 0.007   | 0.288   | 93.157 |
| Amplitude tolerável (N/mm <sup>2</sup> )                               | [σANK]   | 0.007   | 0.288   | 93.157 |
| Soma eficaz Miner  | [DM]     | 0.300   | 0.300   | 0.300  |
| Fator de espectro  | [fKoll]  | 1.000   | 1.000   | 1.000  |
| Segurança contra fadiga  | [S]      |         | 1.952   |        |
| Segurança nominal contra fadiga  | [Smin]   |         | 1.200   |        |
| Resultado (%)  | [S/Smin] |         | 162.6   |        |

|   |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Nível de segurança disponível para a verificação contra ultrapassagem do limite elástico: |       |       |       |       |
| Sensibilidade ao entalhe estática   | [K2F] | 1.000 | 1.200 | 1.200 |

|  |          |         |         |         |
|--|----------|---------|---------|---------|
| Fator de aumento   | [γF]     | 1.100   | 1.100   | 1.000   |
| Limite de escoamento de componentes (N/mm <sup>2</sup> ) | [σFK]    | 550.000 | 660.000 | 346.410 |
| Segurança limite elástico                                | [S]      |         | 2.197   |         |
| Segurança nominal  | [Smin]   |         | 1.200   |         |
| Resultado (%)  | [S/Smin] |         | 183.1   |         |

#### Seção transversal 'D-D' Ressalto do eixo

Comentário Y= 160.00mm

|                                      |        |         |         |                  |
|--------------------------------------|--------|---------|---------|------------------|
| Posição (coordenada Y) (mm)          | [y]    |         | 160.000 |                  |
| Diâmetro externo (mm)                | [da]   |         | 167.000 |                  |
| Diâmetro interno (mm)                | [di]   |         | 0.000   |                  |
| Diâmetro para fator dimensional (mm) | [deff] |         | 188.000 |                  |
| Efeito de entalhe                    |        |         |         | Ressalto do eixo |
| [D, r, t] (mm)                       |        | 188.000 | 1.000   | 10.500           |
| Rugosidade média (μm)                | [Rz]   |         |         | 8.000            |

|   |  | Tração/pressão | Flexão   | Torção   | Cisalhamento |
|---|--|----------------|----------|----------|--------------|
| Carga: (N) (Nm)   |  |                |          |          |              |
| Valor médio   |  |                |          |          |              |
| [Fzdm, Mbm, Tm, Fqm]  |  | 0.0            | 0.0      | 29543.6  | 0.0          |
| Deflexão (amplitude) [Fzda, Mba, Ta, Fqa]                     |  | 0.0            | 21.7     | 29543.6  | 1663.6       |
| Valor máximo [Fzdmax, Mbmax, Tmax, Fqmax]                     |  | 0.0            | 36.9     | 100448.2 | 2828.2       |
| Seção transversal, torques de resistência: (mm <sup>2</sup> ) |  |                |          |          |              |
| [A, Wb, Wt, A]  |  | 21904.0        | 457245.4 | 914490.7 | 21904.0      |

|   |  |       |       |         |       |
|---|--|-------|-------|---------|-------|
| Tensões: (N/mm <sup>2</sup> )                     |  |       |       |         |       |
| [σzdm, σbm, τm, τqm] (N/mm <sup>2</sup> )         |  | 0.000 | 0.000 | 32.306  | 0.000 |
| [σzda, σba, τa, τqa] (N/mm <sup>2</sup> )         |  | 0.000 | 0.048 | 32.306  | 0.101 |
| [σzdmax, σbmax, τmax, τqmax] (N/mm <sup>2</sup> ) |  | 0.000 | 0.081 | 109.841 | 0.172 |

|                                |          |       |  |  |  |
|--------------------------------|----------|-------|--|--|--|
| Efeito tecnológico de tamanhos | [K1(σB)] | 1.000 |  |  |  |
|                                | [K1(σS)] | 1.000 |  |  |  |

|  |         | Tração/pressão | Flexão | Torção |       |
|--|---------|----------------|--------|--------|-------|
| Coefficiente de forma                        | [a]     | 4.132          | 3.770  | 2.331  |       |
| Quebra de tensão relacionada                 | [G']    | 2.454          | 2.454  | 1.150  |       |
| Sensibilidade ao entalhe                     | [n]     | 1.145          | 1.145  | 1.100  |       |
| Coefficiente de efeito de entalhe            | [β]     | 3.607          | 3.291  | 2.119  |       |
| Efeito geométrico de tamanhos                | [K2(d)] | 1.000          | 0.800  | 0.800  |       |
| Fator de influência rugosidade da superfície | [KF]    |                | 0.886  | 0.886  | 0.934 |
| Fator de endurecimento da superfície         | [KV]    | 1.000          | 1.000  | 1.000  |       |
| Fator de influência total                    | [K]     | 3.736          | 4.243  | 2.720  |       |

Nível de segurança disponível para a verificação de resistência permanente:

|   |       |        |  |  |  |
|---|-------|--------|--|--|--|
| Tensão média equivalente (N/mm <sup>2</sup> ) | [σmV] | 55.956 |  |  |  |
| Tensão média equivalente (N/mm <sup>2</sup> ) | [τmV] | 32.306 |  |  |  |

Resistência dos componentes a esforços alternados (N/mm<sup>2</sup>)

|  |          |        |        |        |  |
|--|----------|--------|--------|--------|--|
|  | [σWK]    | 80.307 | 88.385 | 77.219 |  |
| Fator de influência sens. média tensão.  |          |        |        |        |  |
|  | [ψσK]    | 0.057  | 0.063  | 0.054  |  |
| Amplitude tolerável (N/mm <sup>2</sup> ) | [σADK]   | 0.010  | 0.585  | 73.244 |  |
| Amplitude tolerável (N/mm <sup>2</sup> ) | [σANK]   | 0.010  | 0.585  | 73.244 |  |
| Soma eficaz Miner                        | [DM]     | 0.300  | 0.300  | 0.300  |  |
| Fator de espectro                        | [fKoll]  | 1.000  | 1.000  | 1.000  |  |
| Segurança contra fadiga                  | [S]      |        | 2.230  |        |  |
| Segurança nominal contra fadiga          | [Smin]   |        | 1.200  |        |  |
| Resultado (%)                            | [S/Smin] |        | 185.8  |        |  |

Nível de segurança disponível

para a verificação contra ultrapassagem do limite elástico:

|  |        |         |         |         |  |
|--|--------|---------|---------|---------|--|
| Sensibilidade ao entalhe estática                        | [K2F]  | 1.000   | 1.200   | 1.200   |  |
| Fator de aumento   | [γF]   | 1.150   | 1.150   | 1.000   |  |
| Limite de escoamento de componentes (N/mm <sup>2</sup> ) |        |         |         |         |  |
|  | [σFK]  | 575.000 | 690.000 | 346.410 |  |
| Segurança limite elástico                                | [S]    |         | 3.154   |         |  |
| Segurança nominal  | [Smin] |         | 1.200   |         |  |

|               |          |       |
|---------------|----------|-------|
| Resultado (%) | [S/Smin] | 262.8 |
|---------------|----------|-------|

Indicações:

- A força transversal não é tida em conta no cálculo em conformidade com a norma DIN 743.
- Seção transversal com conexão por interferência: Os fatores de chanfro para o caso "conexão por interferência leve" já não estão definidas na norma DIN 743.

Os fatores são adotados da diretiva FKM; exceto se os fatores para "conexão por interferência fixa" em conformidade com a norma DIN forem menores, esses serão usados.

---

|                  |         |     |
|------------------|---------|-----|
| Fim do Relatório | linhas: | 785 |
|------------------|---------|-----|

---

## Veio D (Veio de saída) - calculo do estriado engrenagem Z6

KISSsoft Release 03/2017 F

KISSsoft University license - Universidade do Porto

Arquivo

Nome : Mauro Filipe Rodrigues Domingues

Modificado por: up201404793

Data: Junho de 2019

Hora: -

### UNIÃO DE EIXO DENTADO DIN 5480:2006

Eixo DIN5480 - W 190.00\*10.00\*17\*8h

Cubo DIN5480 - N 190.00\*10.00\*17\*9H

Número no desenho ou artigo:

Eixo: 0.000.0

Cubo: 0.000.0

### 1. GEOMETRIA E MATERIAL DOS DENTES

|   |                 |                             |        |
|---|-----------------|-----------------------------|--------|
| Módulo normal (mm)                            | [mn]            | 10.0000                     |        |
| Diâmetro de referência DIN (mm)               | [dB]            | 190.00                      |        |
| Ângulo de pressão na seção normal (°)         | [alfn]          | 30.000                      |        |
|   |                 | ----- EIXO ----- CUBO ----- |        |
| Número de dentes                              | [z]             | 17                          | -17    |
| ângulo de hélice no círculo de referência (°) | [beta]          | 0.0000                      |        |
| Largura de dente (mm)                         | [b]             | 118.00                      | 116.00 |
| Sentido de inclinação                         | Dentado direito |                             |        |

Material

Engrenagem 1: (Eigene Eingabe) 42 CrMo 4 (1), Aço beneficiado, com liga, beneficiado  
ISO 6336-5 Figura 5/6 (MQ)

Engrenagem 2: 36 CrNiMo 4 (2), Aço beneficiado, temperado à chama/por ind.  
ISO 6336-5 Figura 11/12 (MQ) Flanco e pé endurecidos

|  |       |                            |        |
|--|-------|----------------------------|--------|
|  |       | ----- EIXO ----- CUBO ---- |        |
| Dureza superficial                                     |       | HBW 210                    | HRC 56 |
| Diâmetro de referência de material (mm)                | [dB]  | 188                        | 550    |
| Resistência à ruptura (N/mm <sup>2</sup> )             | [σB]  | 750.00                     | 750.00 |
| Limite de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )            | [σS]  | 500.00                     | 550.00 |
| Módulo de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )            | [E]   | 200000                     | 206000 |
| Número de Poisson                                      | [ν]   | 0.300                      | 0.300  |
| Valor de rugosidade médio Ra, flanco (μm)              | [RAH] | 1.05                       | 0.00   |
| Valor de rugosidade médio Ra, pé (μm)                  | [RAF] | 3.00                       | 0.00   |
| Profundidade da rugosidade Rz determinada, flanco (μm) | [RZH] | 8.00                       | 4.80   |
| Profundidade da rugosidade Rz determinada, pé (μm)     | [RZF] | 20.00                      | 20.00  |

Perfil de referência da engrenagem

1 :

Perfil de referência DIN 5480:2006 0.55 / 0.16 / 0.45 Escarear



|   |          |                         |
|---|----------|-------------------------|
| Fator de altura do pé                   | [hfP*]   | 0.550                   |
| Fator do raio do pé                     | [rhofP*] | 0.160 (rhofPmax*=0.810) |
| Fator de altura da cabeça               | [haP*]   | 0.450                   |
| Fator de raio da cabeça                 | [rhoaP*] | 0.000                   |
| Coefficiente de altura de protuberância | [hprP*]  | 0.000                   |
| Ângulo da protuberância                 | [alfprP] | 0.000                   |
| Fator de altura da forma da cabeça      | [hFaP*]  | 0.000                   |
| Ângulo de flanco de chanfro             | [alfKP]  | 0.000                   |

não sobreposto

Perfil de referência da engrenagem

2 :

Perfil de referência DIN 5480:2006 0.55 / 0.16 / 0.45 Escarear

|   |          |                         |
|---|----------|-------------------------|
| Fator de altura do pé                   | [hfP*]   | 0.550                   |
| Fator do raio do pé                     | [rhofP*] | 0.160 (rhofPmax*=0.810) |
| Fator de altura da cabeça               | [haP*]   | 0.450                   |
| Fator de raio da cabeça                 | [rhoaP*] | 0.000                   |
| Coefficiente de altura de protuberância | [hprP*]  | 0.000                   |
| Ângulo da protuberância                 | [alfprP] | 0.000                   |
| Fator de altura da forma da cabeça      | [hFaP*]  | 0.000                   |
| Ângulo de flanco de chanfro             | [alfKP]  | 0.000                   |

não sobreposto

Resumo perfil de referência das engrenagens:

|   |          |       |       |
|---|----------|-------|-------|
| Perfil de referência da altura do pé    | [hfP*]   | 0.550 | 0.550 |
| Raio do pé, perfil de referência        | [rofpP*] | 0.160 | 0.160 |
| Altura da cabeça perfil de referência   | [haP*]   | 0.450 | 0.450 |
| Coefficiente de altura de protuberância | [hprP*]  | 0.000 | 0.000 |
| Ângulo da protuberância (°)             | [alfprP] | 0.000 | 0.000 |
| Fator de altura da forma da cabeça      | [hFaP*]  | 0.000 | 0.000 |
| Ângulo de flanco de chanfro (°)         | [alfKP]  | 0.000 | 0.000 |

|  |           |        |
|--|-----------|--------|
| Módulo transversal (mm)                        | [mt]      | 10.000 |
| Ângulo de pressão no círculo de referência (°) | [alft]    | 30.000 |
| Ângulo oblíquo de base (°)                     | [betab]   | 0.000  |
| Soma de fatores de correção do perfil          | [Summexi] | 0.0000 |

|  |           | ----- EIXO -----  | CUBO -----        |
|--|-----------|-------------------|-------------------|
| Fator de deslocamento de perfil  | [x]       | 0.4500            | -0.4500           |
| Correção do perfil (x*m) (mm)  | [x*m]     | 4.5000            | -4.5000           |
| Diâmetro de círculo de referência (mm)   | [d]       | 170.000           | 170.000           |
| Diâmetro de base (mm)  | [db]      | 147.224           | 147.224           |
| Diâmetro do círculo da cabeça (mm)   | [da]      | 188.000           | 170.000           |
| Diâmetro do círculo da cabeça efetivo (mm)   | [da.e/i]  | 188.000 / 187.710 | 170.000 / 170.250 |
| Desvios limite do círculo da cabeça (mm)   | [Ada.e/i] | 0.000 / -0.290    | -0.000 / 0.250    |
| Diâmetro do círculo do pé (mm)   | [df]      | 168.000           | 190.000           |
| Diâmetro do círculo do pé efetivo (mm)   | [df.e/i]  | 167.955 / 167.877 | 190.064 / 190.173 |
| Desvios limite do pé (mm)  | [Adf.e/i] | -0.045 / -0.123   | 0.064 / 0.173     |
| Fator de correção do dentado de geração  | [xE.e/i]  | 0.4477 / 0.4439   | -0.4532 / -0.4587 |
| Diâmetro do círculo do perfil do pé (mm)   | [dFf.e/i] | 169.557 / 169.479 | 188.317 / 188.440 |
| (dFf2 calculado com pinhão cortador instalada (aprox): z= 11 x= 0.400 rhoaP0*=0.1) |           |                   |                   |
| Altura do dente (mm)   | [h]       | 10.000            | 10.000            |
| Folga da cabeça teórica (mm)   | [c]       | 1.000             | 1.000             |
| Folga da cabeça efetiva (mm)   | [c.e/i]   | 1.232 / 1.032     | 1.186 / 1.023     |
| Espessura de dente normal no círculo de cabeça (mm)                                | [san]     | 10.103            | 10.512            |
| (mm)   | [san.e/i] | 10.289 / 10.025   | 10.635 / 10.412   |

|  |           |               |               |
|--|-----------|---------------|---------------|
| Largura do espaço normal no círculo do pé (mm) | [efn]     | 9.268         | 8.592         |
| (mm)   | [efn.e/i] | 9.266 / 9.264 | 8.584 / 8.570 |
| Divisão de círculo de referência (mm)          | [pt]      | 31.416        |               |
| Divisão de círculo de base (mm)                | [pbt]     | 27.207        |               |
| Divisão de pressão transversal (mm)            | [pet]     | 27.207        |               |

## 2. MEDIDA DE ENSAIO PARA A ESPESSURA DO DENTE

|   |                | ----- EIXO ----- | CUBO ----- |
|---|----------------|------------------|------------|
| Qualidade de engrenagem                         |                | 8                | 9          |
| Tolerância de espessura de dente                |                | DIN 5480 h       | DIN 5480 H |
| Número de dentes de medida                      | [k]            | 4.0000           | 4.0000     |
| Medida entre dentes sem folgas (mm)             | [Wk]           | 107.6380         | 107.6380   |
| Diâmetro do circuito de medição (mm)            | [dMWk.m]       | 182.3692         | 182.3853   |
| Diâmetro de elemento de medição teor. (mm)      | [dm]           | 22.1004          | 18.5249    |
| Diâmetro efet. de elemento de medição (mm)      | [DMeff]        | 22.0000          | 20.0000    |
| Medida diametral de uma esfera, sem folga (mm)  | [MRe/Mri-ball] | 213.4548         | 145.3551   |
| Medida diametral de um cilindro, sem folga (mm) | [MRe/Mri-pin]  | 213.4548         | 145.3551   |

### Data for Actual Dimensions ( DIN 5480:2006)

|   |                        |                     |                     |
|---|------------------------|---------------------|---------------------|
| Espessura de dente/largura do espaço (mm)           | [Smax/Smin, Emax/Emin] | 20.8781 / 20.8331   | 21.0041 / 20.9411   |
| Tolerância de espessura de dente, seção normal (mm) | [Tol.Smax/min]         | -0.0260 / -0.0710   |                     |
| Tolerância de folga do dente, seção normal (mm)     | [Tol.Emax/min]         |                     | 0.1000 / 0.0370     |
| Medida entre dentes (mm)                            | [Wk.Smax/Smin]         | 107.6155 / 107.5765 | 107.7246 / 107.6700 |
| Medida diametral de duas esferas (mm)               | [MRe/Mri-ball]         | 213.4199 / 213.3596 | 145.5411 / 145.4240 |
| Medida diametral de um cilindro (mm)                | [MRe/Mri-pin]          | 213.4199 / 213.3596 | 145.5411 / 145.4240 |

### Data for Effective Dimensions ( DIN 5480:2006)

|  |                        |                       |                       |
|--|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Espessura de dente/largura do espaço (mm)              | [Svmax/min, Evmax/min] | 20.9041 / 20.8781     | 20.9411 / 20.9041     |
| Tolerância de espessura de dente, seção normal (mm)    | [Tol.Svmax/min]        | 0.0000 / -0.0260      |                       |
| Tolerância de folga do dente, seção normal (mm)        | [Tol.Evmax/min]        |                       | 0.0370 / 0.0000       |
| Medida entre dentes (mm)                               | [Wk.Svmax/min]         | (107.6380 / 107.6155) | (107.6700 / 107.6380) |
| Medida diametral de duas esferas (mm)                  | [MRe/Mri-ball]         | (213.4548 / 213.4199) | (145.4240 / 145.3551) |
| Medida diametral de um cilindro (mm)                   | [MRe/Mri-pin]          | (213.4548 / 213.4199) | (145.4240 / 145.3551) |
| Indicações de tolerância DIN5480-1 (mm)                | [TG]                   | 0.0710                | 0.1000                |
| (mm)   | [Tact]                 | 0.0450                | 0.0630                |
| (mm)   | [Teff]                 | 0.0260                | 0.0370                |
| Folga na circunferência primitiva (seção transversal): |                        |                       |                       |
| -Teoricamente (sem erro formal) (mm)                   | [jt.th]                | 0.1710 / 0.0630       |                       |
| -Efetivo(a) (com erro formal) (mm)                     | [jt.eff]               | 0.0630 / 0.0000       |                       |
| Folga de engrenamento normal teórica (mm)              | [jn.th]                | 0.1481 / 0.0546       |                       |
| Folga de engrenamento normal (mm)                      | [jn.eff]               | 0.0546 / 0.0000       |                       |

Indicação: Durante o controle de splines com medição individual (medida entre dentes/medida do cilindro), as indicações relativas a "Actual Dimensions" (dimensões reais) devem ser respeitadas.

## 3. TOLERÂNCIAS DO DENTADO

----- EIXO ----- CUBO -----

Em conformidade com

DIN 5480:2006:

|  |             |      |      |
|--|-------------|------|------|
| Qualidade de engrenagem                            | [Q-DIN5480] | 8    | 9    |
| Erro total de perfil ( $\mu\text{m}$ )             | [Fa]        | 23.0 | 31.0 |
| Desvio total da linha de flancos ( $\mu\text{m}$ ) | [Fb]        | 21.0 | 24.0 |
| Desvio individual do passo ( $\mu\text{m}$ )       | [fp]        | 19.0 | 27.0 |
| Desvio total do passo ( $\mu\text{m}$ )            | [Fp]        | 45.0 | 63.0 |
| Desvio da concentricidade ( $\mu\text{m}$ )        | [Fr]        | 60.0 | 60.0 |

#### **4. CÁLCULO DA RESISTÊNCIA**

Método de cálculo: G.Niemann, Maschinenelemente I, 4.<sup>a</sup> edição.

Centragem: Centrado pelos flancos

|  |                     |            |
|--|---------------------|------------|
| Comprimento de apoio (mm)              | [ltr]               | 116.00     |
| Força tangencial máxima (N)            | [Ft]                | 1061326.79 |
| Força tangencial máxima por dente (N)  | [Ft/z]              | 62430.99   |
| Diâmetro de aplicação de força (mm)    | [dm]                | 178.98     |
| Altura do dente (mm)                   | [h]                 | 8.73       |
| Distância a0 (mm)                      | [a0]                | 58.00      |
| Fator de comprimento                   | [kl]                | 1.06       |
| Fator proporcional (carga equivalente) | [k $\phi\beta$ q]   | 2.00       |
| Fator proporcional (carga máxima)      | [k $\phi\beta$ max] | 1.70       |

Os fatores proporcionais k $\phi\beta$  segundo Niemann são determinados de acordo com a qualidade de engrenagem em conformidade com a norma DIN 5480.

[Q] 9

|  |         |          |
|--|---------|----------|
| Torque nominal (Nm)                                      | [Tnenn] | 59361.33 |
| Fator de aplicação                                       | [KA]    | 1.60     |
| Torque de funcionamento (Nm)                             | [Teq]   | 94978.13 |
| Torque máximo (Nm)                                       | [Tmax]  | 94978.13 |
| Curva de torque: Com torque alternado                    |         |          |
| Frequência de mudança de pico de carga                   | [NL]    | 10000    |
| Frequência de mudança de sentido de carga                | [NW]    | 1000     |
| Fator de mudança de sentido de carga                     | [fw]    | 1.00     |
| Campo de tolerância em conformidade com a norma DIN 5480 |         | "H9"     |

#### **EIXO**

|   |               |          |
|---|---------------|----------|
| Largura no eixo (mm)  | [l_W]         | 118.00   |
| Superfície de apoio (mm <sup>2</sup> )                      | [Flw=ltr*h*z] | 17215.56 |
| Diâmetro da cabeça (mm)                                     | [dFa1.i]      | 187.71   |
| Esforço de pressão (carga equivalente) (N/mm <sup>2</sup> ) | [peq]         | 131.14   |
| Esforço de pressão (carga máxima) (N/mm <sup>2</sup> )      | [pmax]        | 131.14   |
| Fator de suporte  | [fs]          | 1.20     |
| Fator de pico de carga                                      | [fL]          | 1.40     |
| Fator de influência de endurecimento                        | [fH]          | 1.00     |
| Pressão admissível (N/mm <sup>2</sup> )                     | [pzuleq]      | 600.00   |
| Pressão admissível (N/mm <sup>2</sup> )                     | [pzulmax]     | 840.00   |
| fw * pzul / peq   |               | 4.58     |
| fL * pzul / pmax  |               | 6.41     |
| Segurança nominal   | [Smin]        | 1.00     |
| Segurança mínima  | [S]           | 4.58     |

#### **Cubo**

|  |               |          |
|--|---------------|----------|
| Largura no cubo (mm)                           | [l_N]         | 116.00   |
| Superfície de apoio (mm²)                      | [Fln=ltr*h*z] | 17215.56 |
| Diâmetro da cabeça (mm)                        | [dFa2.i]      | -170.25  |
| Pequeno diâmetro externo (mm)                  | [D1]          | 250.00   |
| Grande diâmetro externo (mm)                   | [D2]          | 550.00   |
| Largura da peça do cubo com D2 (mm)            | [c]           | 116.00   |
| Diâmetro de substituição cubo (mm)             | [D]           | 550.00   |
| Esforço de pressão (carga equivalente) (N/mm²) | [peq]         | 131.14   |
| Esforço de pressão (carga máxima) (N/mm²)      | [pmax]        | 131.14   |
| Fator de suporte                               | [fs]          | 1.50     |
| Fator de pico de carga                         | [fL]          | 1.40     |
| Fator de influência de endurecimento           | [fH]          | 1.15     |
| Pressão admissível (N/mm²)                     | [pzuleq]      | 948.75   |
| Pressão admissível (N/mm²)                     | [pzulmax]     | 1328.25  |
| fw * pzul / peq                                |               | 7.23     |
| fL * pzul / pmax                               |               | 10.13    |
| Segurança nominal                              | [Smin]        | 1.00     |
| Segurança mínima                               | [S]           | 7.23     |

## 5. DADOS COMPLEMENTARES

Momento de inércia (sistema relativo à engrenagem 1):

Cálculo sem ter em conta o perfil exato do dente

Engrenagens individualmente ((da+df)/2...di) (kg\*m²)

|        |                          |             |         |         |
|--------|--------------------------|-------------|---------|---------|
|        |                          | [TraeghMom] | 0.09083 | 8.06577 |
| System | ((da+df)/2...di) (kg*m²) | [TraeghMom] | 8.15659 |         |

## 6. CORREÇÕES E CONFIRMAÇÃO DA FORMA DO PERFIL DO DENTE

Dados para cálculo do perfil do dente:

Dados inexistentes.

### OBSERVAÇÕES:

- Indicações com [e/i] significam: Valor máximo [e] e mínimo [i] perante Tomada em conta de todas as tolerâncias

Indicações com [m] significam: Valor médio na tolerância

- Para método de cálculo:

$$h = (dFa1.i - ABS(dFa2.i)) / 2.0$$

$$dm = (dFa1.i + ABS(dFa2.i)) / 2.0;$$

$$Ft = Mmax * 2000 / dm$$

$$\text{Carga de pressão: } p(eq,max) = k_{phib}(eq,max) * k_1 * M * 2000 / (dm * l * h * z); \quad pmax \geq peq$$

Fator de mudança de sentido de carga em conformidade com a norma DIN 6892:1998/Fig. 6

$$pzuleq = fs * fH * fw * (Rm, Rp)$$

$$pzulmax = fs * fH * fL * (Rm, Rp)$$

(Rm: com material frágil; Rp: com material dúctil)

Fim do Relatório

linhas: 277

## Veio D (Veio de saída) - calculo do estriado de acoplamento

KISSsoft Release 03/2017 F

KISSsoft University license - Universidade do Porto

### Arquivo

Nome : Mauro Filipe Rodrigues Domingues  
Modificado por: up201404793 Data: Junho de 2019 Hora: -

### UNIÃO DE EIXO DENTADO DIN 5480:2006

Eixo DIN5480 - W 150.00\*8.00\*17\*8h  
Cubo DIN5480 - N 150.00\*8.00\*17\*9H

Número no desenho ou artigo:

Eixo: 0.000.0  
Cubo: 0.000.0

### 1. GEOMETRIA E MATERIAL DOS DENTES

|   |                 |                             |
|---|-----------------|-----------------------------|
| Módulo normal (mm)                            | [mn]            | 8.0000                      |
| Diâmetro de referência DIN (mm)               | [dB]            | 150.00                      |
| Ângulo de pressão na seção normal (°)         | [alfn]          | 30.000                      |
|   |                 | ----- EIXO ----- CUBO ----- |
| Número de dentes                              | [z]             | 17 -17                      |
| ângulo de hélice no círculo de referência (°) | [beta]          | 0.0000                      |
| Largura de dente (mm)                         | [b]             | 100.00 100.00               |
| Sentido de inclinação                         | Dentado direito |                             |

|            |                            |   |
|------------|----------------------------|---|
| Material   |                            |   |
| Engrenagem | 1: (Eigene Eingabe)        | 42 CrMo 4 (1), Aço beneficiado, com liga, beneficiado |
|            | ISO 6336-5 Figura 5/6 (MQ) |   |
| Engrenagem | 2: (Eigene Eingabe)        | C45 (1), Aço beneficiado, sem liga, beneficiado       |
|            | ISO 6336-5 Figura 5/6 (MQ) |   |

|  |       | ----- EIXO ----- | CUBO ---- |
|--|-------|------------------|-----------|
| Dureza superficial                                     |       | HBW 210          | HBW 186   |
| Diâmetro de referência de material (mm)                | [dB]  | 148              | 190       |
| Resistência à ruptura (N/mm²)                          | [σB]  | 750.00           | 560.00    |
| Limite de elasticidade (N/mm²)                         | [σS]  | 500.00           | 275.00    |
| Módulo de elasticidade (N/mm²)                         | [E]   | 206000           | 206000    |
| Número de Poisson                                      | [ν]   | 0.300            | 0.300     |
| Valor de rugosidade médio Ra, flanco (μm)              | [RAH] | 1.05             | 1.05      |
| Valor de rugosidade médio Ra, pé (μm)                  | [RAF] | 3.00             | 3.00      |
| Profundidade da rugosidade Rz determinada, flanco (μm) | [RZH] | 8.00             | 8.00      |
| Profundidade da rugosidade Rz determinada, pé (μm)     | [RZF] | 20.00            | 20.00     |

Perfil de referência da engrenagem

1 :

Perfil de referência DIN 5480:2006 0.55 / 0.16 / 0.45 Escarear

Fator de altura do pé [hfP\*] 0.550

Fator do raio do pé [rhofP\*] 0.160 (rhofPmax\*=0.810)

|  |          |       |
|--|----------|-------|
| Fator de altura da cabeça              | [haP*]   | 0.450 |
| Fator de raio da cabeça                | [rhoaP*] | 0.000 |
| Coeficiente de altura de protuberância | [hprP*]  | 0.000 |
| Ângulo da protuberância                | [alfprP] | 0.000 |
| Fator de altura da forma da cabeça     | [hFaP*]  | 0.000 |
| Ângulo de flanco de chanfro            | [alfKP]  | 0.000 |

não sobreposto

Perfil de referência da engrenagem

2 :

Perfil de referência DIN 5480:2006 0.55 / 0.16 / 0.45 Escarear

|  |          |                         |
|--|----------|-------------------------|
| Fator de altura do pé                  | [hfP*]   | 0.550                   |
| Fator do raio do pé                    | [rhofP*] | 0.160 (rhofPmax*=0.810) |
| Fator de altura da cabeça              | [haP*]   | 0.450                   |
| Fator de raio da cabeça                | [rhoaP*] | 0.000                   |
| Coeficiente de altura de protuberância | [hprP*]  | 0.000                   |
| Ângulo da protuberância                | [alfprP] | 0.000                   |
| Fator de altura da forma da cabeça     | [hFaP*]  | 0.000                   |
| Ângulo de flanco de chanfro            | [alfKP]  | 0.000                   |

não sobreposto

Resumo perfil de referência das engrenagens:

|  |          |       |       |
|--|----------|-------|-------|
| Perfil de referência da altura do pé   | [hfP*]   | 0.550 | 0.550 |
| Raio do pé, perfil de referência       | [rhofP*] | 0.160 | 0.160 |
| Altura da cabeça perfil de referência  | [haP*]   | 0.450 | 0.450 |
| Coeficiente de altura de protuberância | [hprP*]  | 0.000 | 0.000 |
| Ângulo da protuberância (°)            | [alfprP] | 0.000 | 0.000 |
| Fator de altura da forma da cabeça     | [hFaP*]  | 0.000 | 0.000 |
| Ângulo de flanco de chanfro (°)        | [alfKP]  | 0.000 | 0.000 |

|  |           |        |
|--|-----------|--------|
| Módulo transversal (mm)                        | [mt]      | 8.000  |
| Ângulo de pressão no círculo de referência (°) | [alft]    | 30.000 |
| Ângulo oblíquo de base (°)                     | [betab]   | 0.000  |
| Soma de fatores de correção do perfil          | [Summexi] | 0.0000 |

|  |           | ----- EIXO -----  | CUBO -----        |
|--|-----------|-------------------|-------------------|
| Fator de deslocamento de perfil  | [x]       | 0.3250            | -0.3250           |
| Correção do perfil (x*m) (mm)  | [x*m]     | 2.6000            | -2.6000           |
| Diâmetro de círculo de referência (mm)   | [d]       | 136.000           | 136.000           |
| Diâmetro de base (mm)  | [db]      | 117.779           | 117.779           |
| Diâmetro do círculo da cabeça (mm)   | [da]      | 148.400           | 134.000           |
| Diâmetro do círculo da cabeça efetivo (mm)   | [da.e/i]  | 148.400 / 148.150 | 134.000 / 134.250 |
| Desvios limite do círculo da cabeça (mm)   | [Ada.e/i] | 0.000 / -0.250    | -0.000 / 0.250    |
| Diâmetro do círculo do pé (mm)   | [df]      | 132.400           | 150.000           |
| Diâmetro do círculo do pé efetivo (mm)   | [df.e/i]  | 132.355 / 132.277 | 150.064 / 150.173 |
| Desvios limite do pé (mm)  | [Adf.e/i] | -0.045 / -0.123   | 0.064 / 0.173     |
| Fator de correção do dentado de geração  | [xE.e/i]  | 0.3222 / 0.3173   | -0.3290 / -0.3358 |
| Diâmetro do círculo do perfil do pé (mm)   | [dFf.e/i] | 133.698 / 133.624 | 148.174 / 148.329 |
| (dFf2 calculado com pinhão cortador instalada (aprox): z= 11 x= 0.400 rhoaP0*=0.1) |           |                   |                   |
| Altura do dente (mm)   | [h]       | 8.000             | 8.000             |
| Folga da cabeça teórica (mm)   | [c]       | 0.800             | 0.800             |
| Folga da cabeça efetiva (mm)   | [c.e/i]   | 1.012 / 0.832     | 0.986 / 0.823     |
| Espessura de dente normal no círculo de cabeça (mm)                                | [san]     | 8.265             | 8.312             |
| (mm)   | [san.e/i] | 8.414 / 8.188     | 8.427 / 8.213     |
| Largura do espaço normal no círculo do pé (mm)                                     | [efn]     | 7.372             | 7.104             |
| (mm)   | [efn.e/i] | 7.372 / 7.372     | 7.097 / 7.085     |

|                                       |       |        |
|---------------------------------------|-------|--------|
| Divisão de círculo de referência (mm) | [pt]  | 25.133 |
| Divisão de círculo de base (mm)       | [pbt] | 21.766 |
| Divisão de pressão transversal (mm)   | [pet] | 21.766 |

## 2. MEDIDA DE ENSAIO PARA A ESPESSURA DO DENTE

|   |                | ----- EIXO ----- | CUBO ----- |
|---|----------------|------------------|------------|
|   |                | 8                | 9          |
| Qualidade de engrenagem                         |                | DIN 5480 h       | DIN 5480 H |
| Tolerância de espessura de dente                |                |                  |            |
| Número de dentes de medida                      | [k]            | 4.0000           | 4.0000     |
| Medida entre dentes sem folgas (mm)             | [Wk]           | 85.1104          | 85.1104    |
| Diâmetro do circuito de medição (mm)            | [dMWk.m]       | 145.3061         | 145.3221   |
| Diâmetro de elemento de medição teor. (mm)      | [dm]           | 16.9383          | 14.6015    |
| Diâmetro efet. de elemento de medição (mm)      | [DMeff]        | 18.0000          | 15.0000    |
| Medida diametral de uma esfera, sem folga (mm)  | [MRe/Mri-ball] | 170.2309         | 117.2841   |
| Medida diametral de um cilindro, sem folga (mm) | [MRe/Mri-pin]  | 170.2309         | 117.2841   |

### Data for Actual Dimensions (DIN 5480:2006)

|   |                        |                     |                     |
|---|------------------------|---------------------|---------------------|
| Espessura de dente/largura do espaço (mm)           | [Smax/Smin, Emax/Emin] | 15.5426 / 15.4976   | 15.6686 / 15.6056   |
| Tolerância de espessura de dente, seção normal (mm) | [Tol.Smax/min]         | -0.0260 / -0.0710   |                     |
| Tolerância de folga do dente, seção normal (mm)     | [Tol.Emax/min]         |                     | 0.1000 / 0.0370     |
| Medida entre dentes (mm)                            | [Wk.Smax/Smin]         | 85.0879 / 85.0489   | 85.1970 / 85.1424   |
| Medida diametral de duas esferas (mm)               | [MRe/Mri-ball]         | 170.1957 / 170.1348 | 117.4700 / 117.3530 |
| Medida diametral de um cilindro (mm)                | [MRe/Mri-pin]          | 170.1957 / 170.1348 | 117.4700 / 117.3530 |

### Data for Effective Dimensions (DIN 5480:2006)

|   |                        |                       |                       |
|---|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Espessura de dente/largura do espaço (mm)           | [Svmax/min, Evmax/min] | 15.5686 / 15.5426     | 15.6056 / 15.5686     |
| Tolerância de espessura de dente, seção normal (mm) | [Tol.Svmax/min]        | 0.0000 / -0.0260      |                       |
| Tolerância de folga do dente, seção normal (mm)     | [Tol.Evmax/min]        |                       | 0.0370 / 0.0000       |
| Medida entre dentes (mm)                            | [Wk.Svmax/min]         | (85.1104 / 85.0879)   | (85.1424 / 85.1104)   |
| Medida diametral de duas esferas (mm)               | [MRe/Mri-ball]         | (170.2309 / 170.1957) | (117.3530 / 117.2841) |
| Medida diametral de um cilindro (mm)                | [MRe/Mri-pin]          | (170.2309 / 170.1957) | (117.3530 / 117.2841) |
| Indicações de tolerância DIN5480-1 (mm)             | [TG]                   | 0.0710                | 0.1000                |
| (mm)  | [Tact]                 | 0.0450                | 0.0630                |
| (mm)  | [Teff]                 | 0.0260                | 0.0370                |

Folga na circunferência primitiva (seção transversal):

|   |          |                 |
|---|----------|-----------------|
| -Teoricamente (sem erro formal) (mm)      | [jt.th]  | 0.1710 / 0.0630 |
| -Efetivo(a) (com erro formal) (mm)        | [jt.eff] | 0.0630 / 0.0000 |
| Folga de engrenamento normal teórica (mm) | [jn.th]  | 0.1481 / 0.0546 |
| Folga de engrenamento normal (mm)         | [jn.eff] | 0.0546 / 0.0000 |

Indicação: Durante o controle de splines com medição individual (medida entre dentes/medida do cilindro), as indicações relativas a "Actual Dimensions" (dimensões reais) devem ser respeitadas.

## 3. TOLERÂNCIAS DO DENTADO

|                     |  | ----- EIXO ----- | CUBO ----- |
|---------------------|--|------------------|------------|
| Em conformidade com |  |                  |            |
| DIN 5480:2006:      |  |                  |            |

|  |             |      |      |
|--|-------------|------|------|
| Qualidade de engrenagem                            | [Q-DIN5480] | 8    | 9    |
| Erro total de perfil ( $\mu\text{m}$ )             | [Fa]        | 23.0 | 31.0 |
| Desvio total da linha de flancos ( $\mu\text{m}$ ) | [Fb]        | 15.0 | 18.0 |
| Desvio individual do passo ( $\mu\text{m}$ )       | [fp]        | 19.0 | 27.0 |
| Desvio total do passo ( $\mu\text{m}$ )            | [Fp]        | 45.0 | 63.0 |
| Desvio da concentricidade ( $\mu\text{m}$ )        | [Fr]        | 60.0 | 60.0 |

#### **4. CÁLCULO DA RESISTÊNCIA**

Método de cálculo: G.Niemann, Maschinenelemente I, 4.ª edição.

Centragem: Centrado pelos flancos

|  |                       |            |
|--|-----------------------|------------|
| Comprimento de apoio (mm)              | [l <sub>tr</sub> ]    | 100.00     |
| Força tangencial máxima (N)            | [F <sub>t</sub> ]     | 1345299.35 |
| Força tangencial máxima por dente (N)  | [F <sub>t</sub> /z]   | 79135.26   |
| Diâmetro de aplicação de força (mm)    | [d <sub>m</sub> ]     | 141.20     |
| Altura do dente (mm)                   | [h]                   | 6.95       |
| Distância a <sub>0</sub> (mm)          | [a <sub>0</sub> ]     | 50.00      |
| Fator de comprimento                   | [k <sub>l</sub> ]     | 1.07       |
| Fator proporcional (carga equivalente) | [k <sub>φβq</sub> ]   | 2.00       |
| Fator proporcional (carga máxima)      | [k <sub>φβmax</sub> ] | 1.70       |

Os fatores proporcionais k<sub>φβ</sub> segundo Niemann são determinados de acordo com a qualidade de engrenagem em conformidade com a norma DIN 5480.

[Q] 9

|  |                     |          |
|--|---------------------|----------|
| Torque nominal (Nm)                                      | [T <sub>enn</sub> ] | 59361.33 |
| Fator de aplicação                                       | [K <sub>A</sub> ]   | 1.60     |
| Torque de funcionamento (Nm)                             | [T <sub>eq</sub> ]  | 94978.13 |
| Torque máximo (Nm)                                       | [T <sub>max</sub> ] | 94978.13 |
| Curva de torque: Com torque alternado                    |                     |          |
| Frequência de mudança de pico de carga                   | [N <sub>L</sub> ]   | 10000    |
| Frequência de mudança de sentido de carga                | [N <sub>W</sub> ]   | 1000     |
| Fator de mudança de sentido de carga                     | [f <sub>w</sub> ]   | 1.00     |
| Campo de tolerância em conformidade com a norma DIN 5480 |                     | "H9"     |

#### **EIXO**

|   |   |          |
|---|---|----------|
| Largura no eixo (mm)  | [l <sub>_W</sub> ]                      | 100.00   |
| Superfície de apoio (mm <sup>2</sup> )                      | [F <sub>lw</sub> =l <sub>tr</sub> *h*z] | 11815.00 |
| Diâmetro da cabeça (mm)                                     | [d <sub>Fa1.i</sub> ]                   | 148.15   |
| Esforço de pressão (carga equivalente) (N/mm <sup>2</sup> ) | [p <sub>eq</sub> ]                      | 244.13   |
| Esforço de pressão (carga máxima) (N/mm <sup>2</sup> )      | [p <sub>max</sub> ]                     | 244.13   |
| Fator de suporte  | [f <sub>s</sub> ]                       | 1.20     |
| Fator de pico de carga                                      | [f <sub>L</sub> ]                       | 1.40     |
| Fator de influência de endurecimento                        | [f <sub>H</sub> ]                       | 1.00     |
| Pressão admissível (N/mm <sup>2</sup> )                     | [p <sub>zul<sub>eq</sub></sub> ]        | 600.00   |
| Pressão admissível (N/mm <sup>2</sup> )                     | [p <sub>zul<sub>max</sub></sub> ]       | 840.00   |
| f <sub>w</sub> * p <sub>zul</sub> / p <sub>eq</sub>         |   | 2.46     |
| f <sub>L</sub> * p <sub>zul</sub> / p <sub>max</sub>        |   | 3.44     |
| Segurança nominal   | [S <sub>min</sub> ]                     | 1.00     |
| Segurança mínima  | [S]                                     | 2.46     |

#### **Cubo**

|  |   |          |
|--|---|----------|
| Largura no cubo (mm)                   | [l <sub>_N</sub> ]                      | 100.00   |
| Superfície de apoio (mm <sup>2</sup> ) | [F <sub>ln</sub> =l <sub>tr</sub> *h*z] | 11815.00 |



|  |           |         |
|--|-----------|---------|
| Diâmetro da cabeça (mm)                        | [dFa2.i]  | -134.25 |
| Pequeno diâmetro externo (mm)                  | [D1]      | 190.00  |
| Grande diâmetro externo (mm)                   | [D2]      | 190.00  |
| Largura da peça do cubo com D2 (mm)            | [c]       | 100.00  |
| Diâmetro de substituição cubo (mm)             | [D]       | 190.00  |
| Esforço de pressão (carga equivalente) (N/mm²) | [peq]     | 244.13  |
| Esforço de pressão (carga máxima) (N/mm²)      | [pmax]    | 244.13  |
| Fator de suporte                               | [fs]      | 1.50    |
| Fator de pico de carga                         | [fL]      | 1.40    |
| Fator de influência de endurecimento           | [fH]      | 1.00    |
| Pressão admissível (N/mm²)                     | [pzuleq]  | 412.50  |
| Pressão admissível (N/mm²)                     | [pzulmax] | 577.50  |
| fw * pzul / peq                                |           | 1.69    |
| fL * pzul / pmax                               |           | 2.37    |
| Segurança nominal                              | [Smin]    | 1.00    |
| Segurança mínima                               | [S]       | 1.69    |

## 5. DADOS COMPLEMENTARES

Momento de inércia (sistema relativo à engrenagem 1):

Cálculo sem ter em conta o perfil exato do dente

Engrenagens individualmente  $((da+df)/2...di)$  (kg\*m²)

|        |                            |             |         |         |
|--------|----------------------------|-------------|---------|---------|
|        |                            | [TraeghMom] | 0.02978 | 0.06882 |
| System | $((da+df)/2...di)$ (kg*m²) | [TraeghMom] | 0.09860 |         |

## 6. CORREÇÕES E CONFIRMAÇÃO DA FORMA DO PERFIL DO DENTE

Dados para cálculo do perfil do dente:

Dados inexistentes.

### OBSERVAÇÕES:

- Indicações com  $[.e/i]$  significam: Valor máximo [e] e mínimo [i] perante

Tomada em conta de todas as tolerâncias

Indicações com  $[.m]$  significam: Valor médio na tolerância

- Para método de cálculo:

$$h = (dFa1.i - ABS(dFa2.i)) / 2.0$$

$$dm = (dFa1.i + ABS(dFa2.i)) / 2.0;$$

$$Ft = Mmax * 2000 / dm$$

$$\text{Carga de pressão: } p(eq,max) = kphib(eq,max) * k1 * M * 2000 / (dm * l * h * z); pmax \geq peq$$

Fator de mudança de sentido de carga em conformidade com a norma DIN 6892:1998/Fig. 6

$$pzuleq = fs * fH * fw * (Rm, Rp)$$

$$pzulmax = fs * fH * fL * (Rm, Rp)$$

(Rm: com material frágil; Rp: com material dúctil)

Fim do Relatório

linhas: 277

*Página intencionalmente em branco*

## D.2 Análise energética da concepção final

KISSsoft-Entwicklungs-Version

KISSsoft AG

CH-8608 BUBIKON

File

Name: Mauro Filipe Rodrigues Domingues

Gear box: Design of 375 KW "power split" industrial gear transmission

KISSSYS THERMAL RATING REPORT ALONG ISO/TR14179-1, ISO/TR14179-2,  
Niemann/Wech/Contact Analysis, SKF/Schaeffler

## 1. SUMMARY

## 1.1 Individual power input points

|              |       |          |
|--------------|-------|----------|
| _O.Boundary1 |       |          |
| Speed        | [Rpm] | 1000     |
| Torque       | [Nm]  | 3580.986 |
| Power        | [W]   | 375000   |

## 1.2 Individual power output points

|              |       |            |
|--------------|-------|------------|
| _O.Boundary2 |       |            |
| Speed        | [Rpm] | 60.325     |
| Torque       | [Nm]  | -59361.334 |
| Power        | [W]   | 375000     |

## 1.3 Global results

|   |     |               |
|---|-----|---------------|
| Type of calculation                     |     | Heat transfer |
| Total power input                       | [W] | 375000        |
| Total power output                      | [W] | 371607.8      |
| Total power losses                      | [W] | 3392.2        |
| Gearbox efficiency (total with factors) | [%] | 99.1          |
| Gearbox efficiency (only gear mesh)     | [%] | 99.3          |

## 1.4 Heat generated

|                              |     |        |
|------------------------------|-----|--------|
| Gear churning losses PVZ0    | [W] | 23.3   |
| Gear meshing losses PVZ      | [W] | 2643.8 |
| Bearing losses PVL+PVL0      | [W] | 657.7  |
| Seal losses PVD (+rest PVD0) | [W] | 67.4   |
| Total power losses           | [W] | 3392.2 |

## 1.5 Heat dissipated

|                        |     |        |
|------------------------|-----|--------|
| Housing w/ finning     | [W] | 3353.7 |
| Housing                | [W] | 3353.7 |
| Foundation             | [W] | 37.4   |
| Input/Output Shafts    | [W] | 272.8  |
| Oil Cooler             | [W] | 0      |
| Total Heat Dissipation | [W] | 3663.9 |

## 1.5 Global correction factors

|   |   |
|---|---|
| Regarding the Meshing losses PVZ              | 1 |
| Regarding the Churning losses PVZ0            | 1 |
| Regarding the Bearing losses PVL+PVL0         | 1 |
| Regarding the Sealing losses PVD              | 1 |
| Regarding the housing dissipation             | 1 |
| Regarding the foundations dissipation         | 1 |
| Regarding the input/output shafts dissipation | 1 |

## 2. SETTINGS

## 2.1 General settings

|                                       |                |
|---------------------------------------|----------------|
| Calculation method                    | ISO/TR 14179-2 |
| Consideration of the thermal finning  | Yes            |
| Consideration of the foundations      | Yes            |
| Consideration of the shafts/couplings | Yes            |

## 2.2 Ventilation

|                            |                         |                     |
|----------------------------|-------------------------|---------------------|
| Ventilated surface         |                         | Normal to x-z plane |
| Air velocity               | [m/s]                   | 3                   |
| Ambient air temperature    | [deg. C]                | 30                  |
| Ventilated air temperature | [deg. C]                | 30                  |
| Heat transfer coefficient  | [W/(m <sup>2</sup> *K)] | 37.186              |

## 2.3 Lubrication

|                                 |          |               |
|---------------------------------|----------|---------------|
| Connect oil temperature         |          | Yes           |
| Global oil temperature          | [deg. C] | 60            |
| Connect oil level               |          | Yes           |
| Oil bath setup                  |          | Set oil level |
| Oil level (z-coordinate global) | [mm]     | -290          |

## 2.4 Housing data

|                      |                   |                |
|----------------------|-------------------|----------------|
| Housing form         |                   | Cuboid         |
| Housing material     |                   | Cast iron(GGG) |
| Surface treatment    |                   | Casting scale  |
| Wall tickness        | [mm]              | 18             |
| Wall temperature     | [deg. C]          | 24             |
| Length (ly)          | [mm]              | 353.424        |
| Width (lx)           | [mm]              | 1511.012       |
| Height (lz)          | [mm]              | 663.012        |
| Housing surface area | [m <sup>2</sup> ] | 3.5            |
| Oil surface area     | [m <sup>2</sup> ] | 3.14788        |

## 2.5 Thermal finnings data

|                         |                   |       |
|-------------------------|-------------------|-------|
| Total surface area      | [m <sup>2</sup> ] | 4.5   |
| Projected surface area  | [m <sup>2</sup> ] | 1.096 |
| Ventilated surface area | [m <sup>2</sup> ] | 1.28  |
| Height                  | [mm]              | 30    |
| Thickness               | [mm]              | 5     |

## 2.6 Foundations data

|                           |      |          |
|---------------------------|------|----------|
| Foundations material      |      | Concrete |
| Ratio foot/bottom surface | [%]  | 25       |
| Length of foundation L1   | [mm] | 40       |
| Length of foundation L2   | [mm] | 10       |
| Length of foundation L3   | [mm] | 30       |
| Length of foundation L4   | [mm] | 20       |
| Height of foundation H    | [mm] | 10       |

## 2.7 Input/Output shafts data

|        |                             |          |     |
|--------|-----------------------------|----------|-----|
| Veio B | Heat conduction coefficient | [W/(mK)] | 50  |
|        | Outcoming length            | [mm]     | 28  |
|        | Outcoming mean diameter     | [mm]     | 120 |
| Veio A | Heat conduction coefficient | [W/(mK)] | 50  |
|        | Outcoming length            | [mm]     | 162 |
|        | Outcoming mean diameter     | [mm]     | 85  |
| Veio A | Heat conduction coefficient | [W/(mK)] | 50  |
|        | Outcoming length            | [mm]     | 105 |
|        | Outcoming mean diameter     | [mm]     | 75  |
| Veio C | Heat conduction coefficient | [W/(mK)] | 50  |
|        | Outcoming length            | [mm]     | 28  |
|        | Outcoming mean diameter     | [mm]     | 120 |

|        |                             |          |       |
|--------|-----------------------------|----------|-------|
| Veio D | Heat conduction coefficient | [W/(mK)] | 50    |
|        | Outcoming length            | [mm]     | 294.1 |
|        | Outcoming mean diameter     | [mm]     | 160   |
| Veio D | Heat conduction coefficient | [W/(mK)] | 50    |
|        | Outcoming length            | [mm]     | 130   |
|        | Outcoming mean diameter     | [mm]     | 145   |

### 3. INDIVIDUAL POWER LOSSES

#### 3.1 Gear meshing losses PVZ, calculated according to Niemann/Wech/Contact Analysis

|                    |            |     |           |
|--------------------|------------|-----|-----------|
| Engrenamento z1/z2 |            |     |           |
|                    | Loss       | [W] | 484.73577 |
|                    | Correction |     | 1         |
| Engrenamento z1/z4 |            |     |           |
|                    | Loss       | [W] | 484.72577 |
|                    | Correction |     | 1         |
| Engrenamento z3/z6 |            |     |           |
|                    | Loss       | [W] | 837.80687 |
|                    | Correction |     | 1         |
| Engrenamento z5/z6 |            |     |           |
|                    | Loss       | [W] | 837.80687 |
|                    | Correction |     | 1         |

#### 3.2 Gear churning losses PVZ0, calculated according to ISO/TR 14179 part 1 and 2

|               |            |     |         |
|---------------|------------|-----|---------|
| Engrenagem z1 |            |     |         |
|               | Loss       | [W] | 0       |
|               | Correction |     | 1       |
| Engrenagem z2 |            |     |         |
|               | Loss       | [W] | 7.64893 |
|               | Correction |     | 1       |
| Engrenagem z3 |            |     |         |
|               | Loss       | [W] | 0       |
|               | Correction |     | 1       |
| Engrenagem z4 |            |     |         |
|               | Loss       | [W] | 7.64893 |
|               | Correction |     | 1       |
| Engrenagem z5 |            |     |         |
|               | Loss       | [W] | 0       |
|               | Correction |     | 1       |
| Engrenagem z6 |            |     |         |
|               | Loss       | [W] | 7.96845 |
|               | Correction |     | 1       |

#### 3.3 Bearing rolling and sliding friction losses PVL+PVL0, calculated according to SKF/Schaeffler

|       |            |     |         |
|-------|------------|-----|---------|
| Rol 1 |            |     |         |
|       | Loss       | [W] | 112.326 |
|       | Correction |     | 1       |
| Rol 2 |            |     |         |
|       | Loss       | [W] | 263.672 |
|       | Correction |     | 1       |
| Rol 3 |            |     |         |
|       | Loss       | [W] | 37.000  |
|       | Correction |     | 1       |
| Rol 4 |            |     |         |
|       | Loss       | [W] | 103.634 |
|       | Correction |     | 1       |
| Rol 5 |            |     |         |
|       | Loss       | [W] | 36.610  |
|       | Correction |     | 1       |
| Rol 6 |            |     |         |
|       | Loss       | [W] | 101.170 |
|       | Correction |     | 1       |
| Rol 7 |            |     |         |
|       | Loss       | [W] | 1.731   |
|       | Correction |     | 1       |
| Rol 8 |            |     |         |

|            |     |       |
|------------|-----|-------|
| Loss       | [W] | 1.819 |
| Correction |     | 1     |

3.4 Seal friction losses PVD, calculated according to ISO/TR 14179 part 1 and 2

|        |            |     |          |
|--------|------------|-----|----------|
| Veio A | Loss       | [W] | 55.56018 |
|        | Correction |     | 1        |
| Veio D | Loss       | [W] | 11.87585 |
|        | Correction |     | 1        |

3.5 Other losses

---

End of Report

---

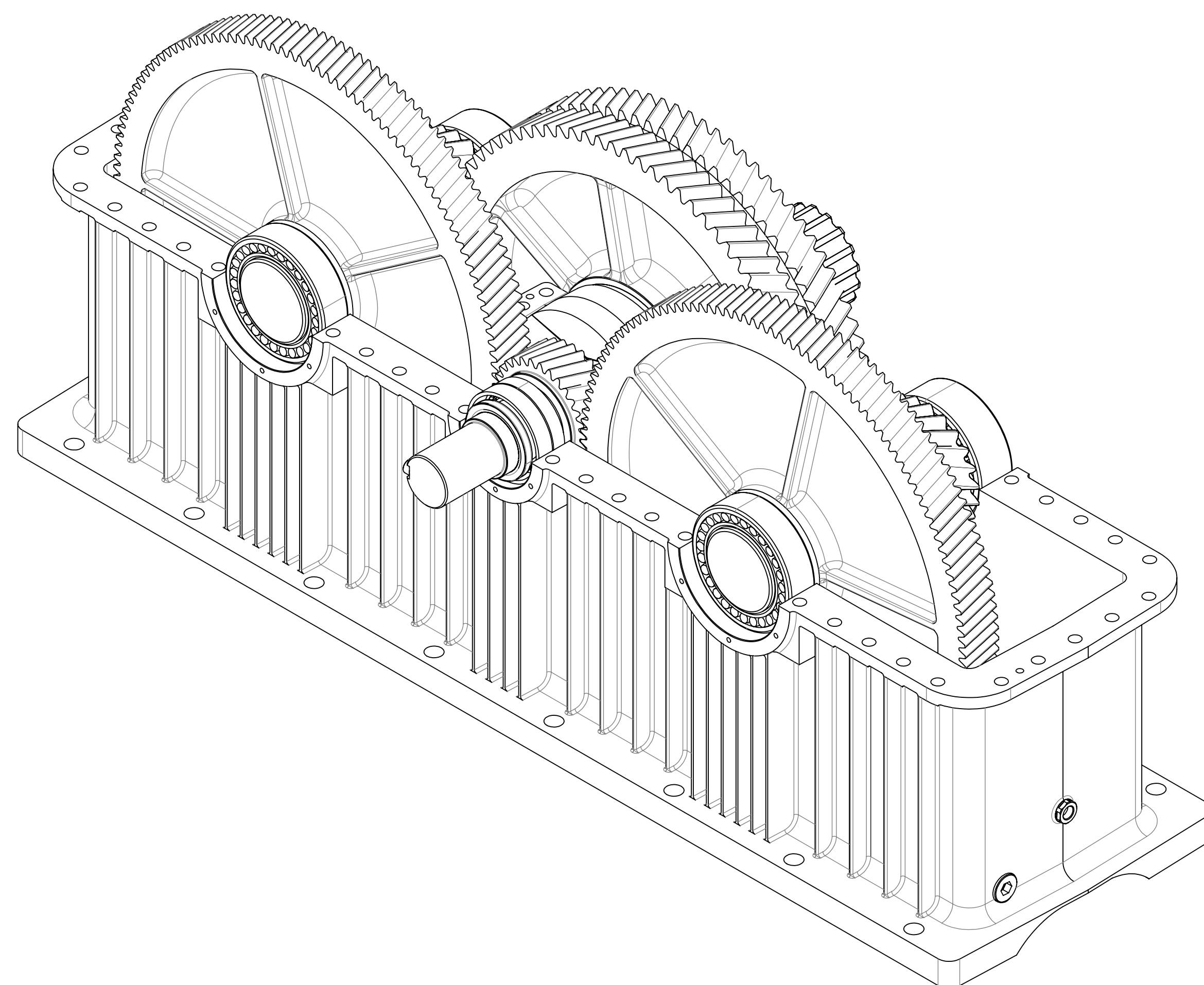
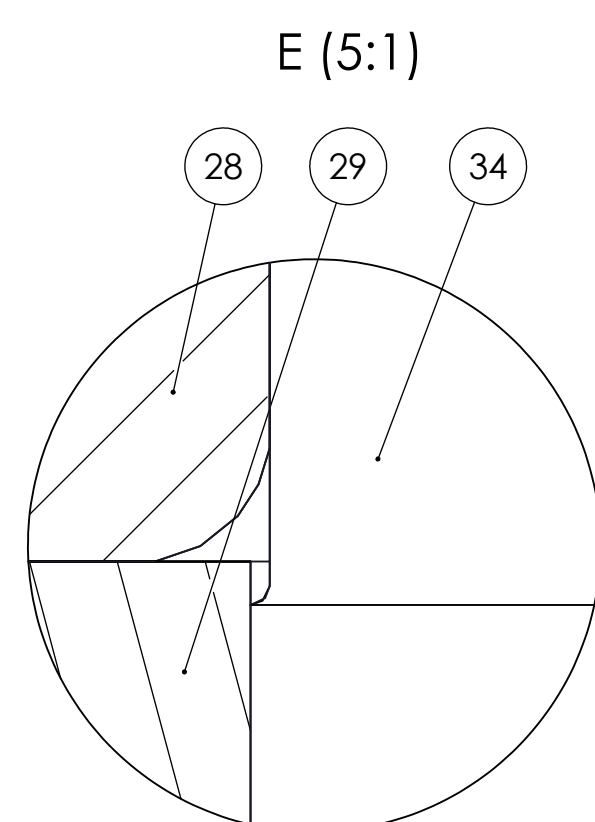
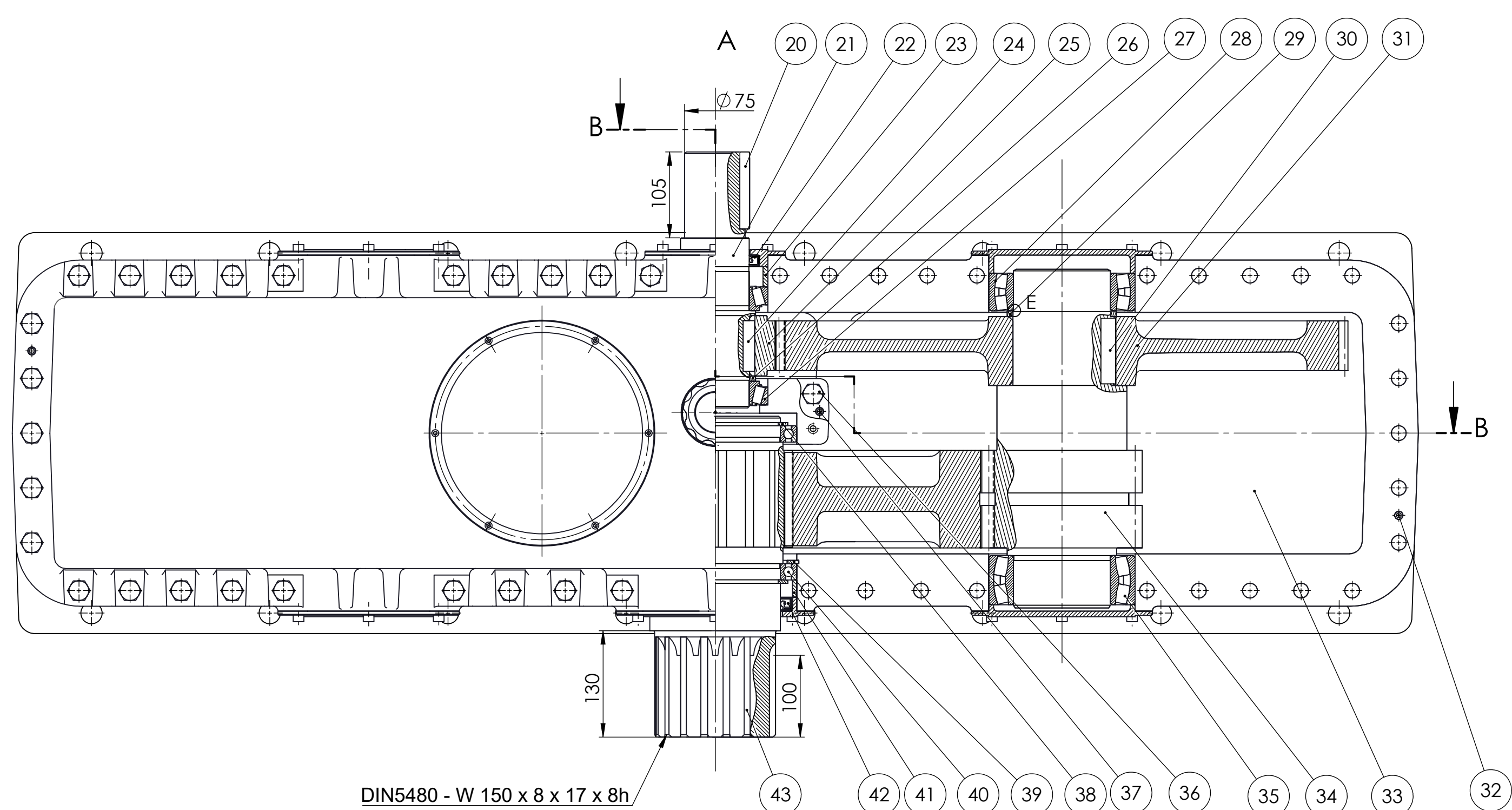
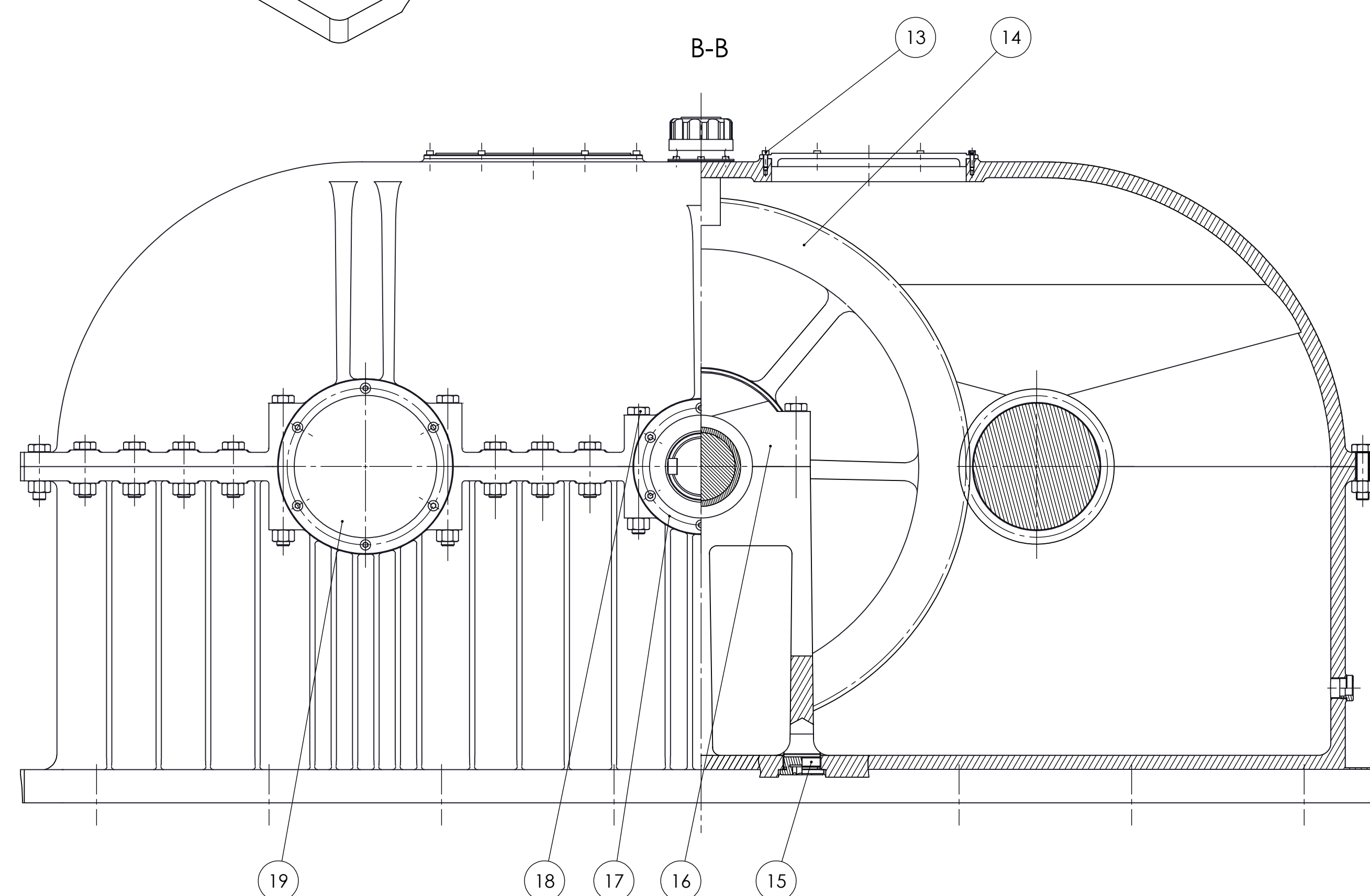
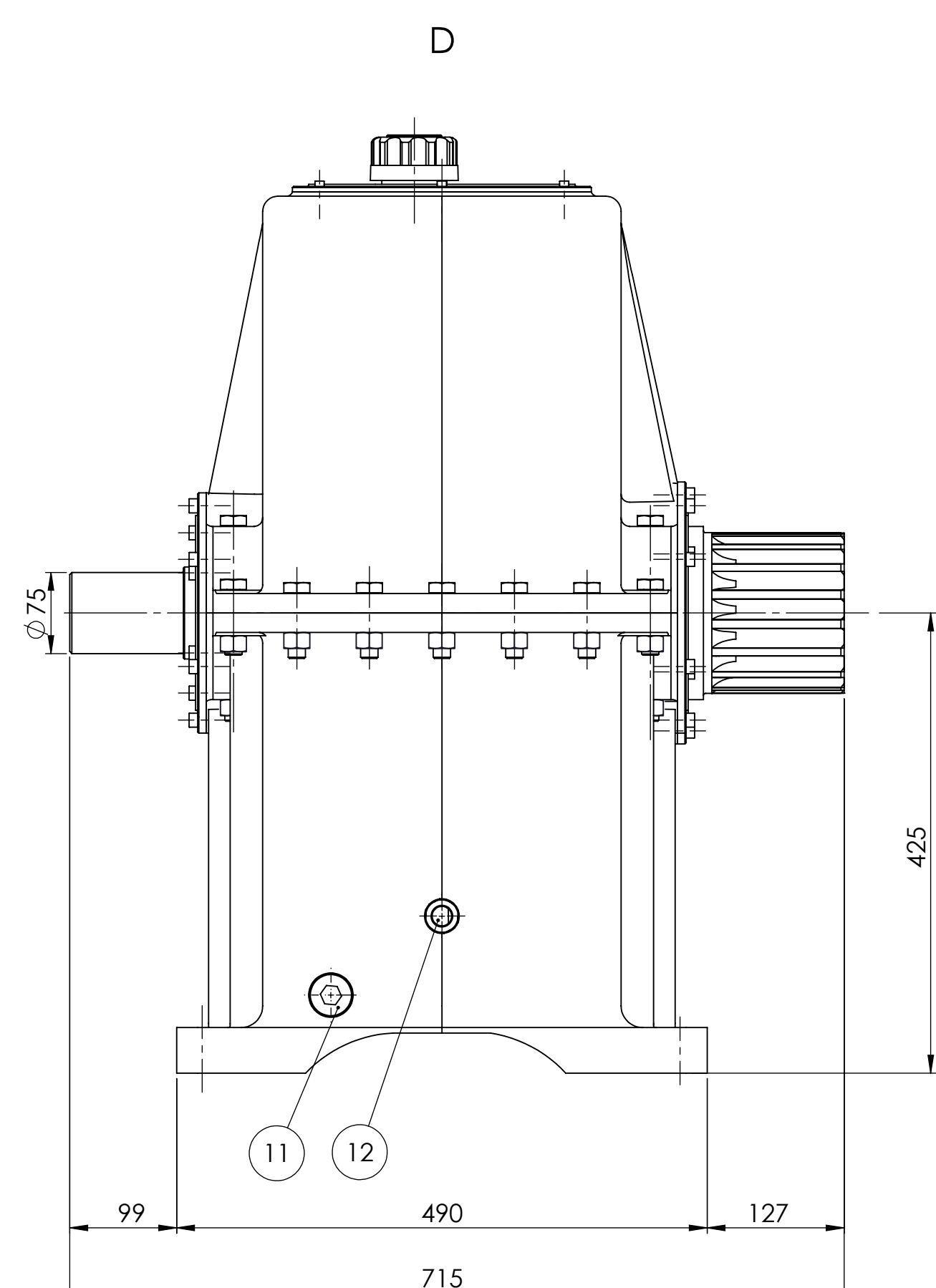
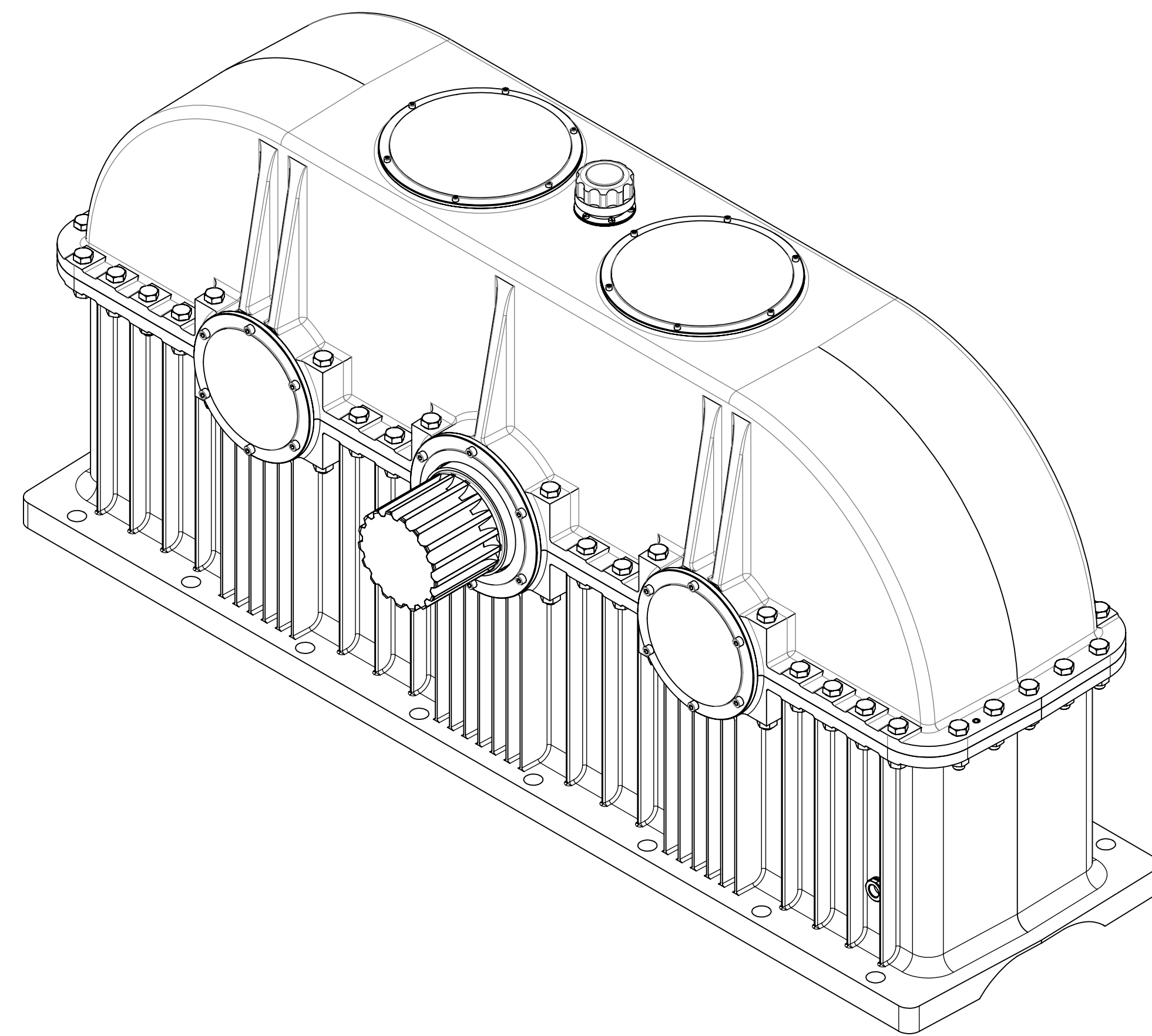
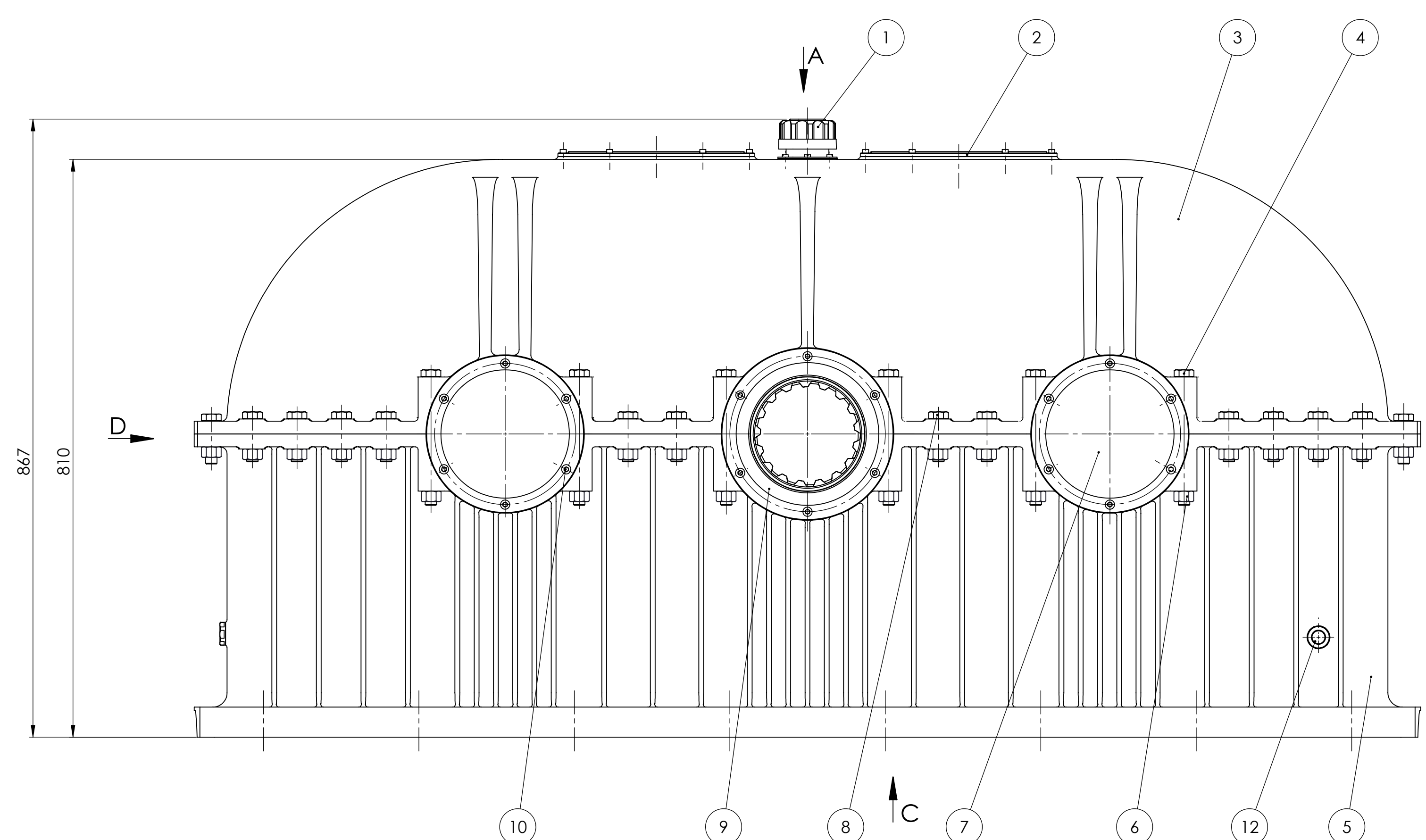
*Página intencionalmente em branco*



## E Anexo:Desenhos do redutor - *Solidworks*®

### E.1 Desenho de conjunto

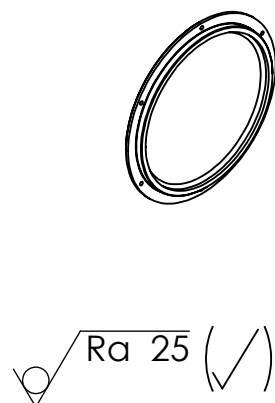
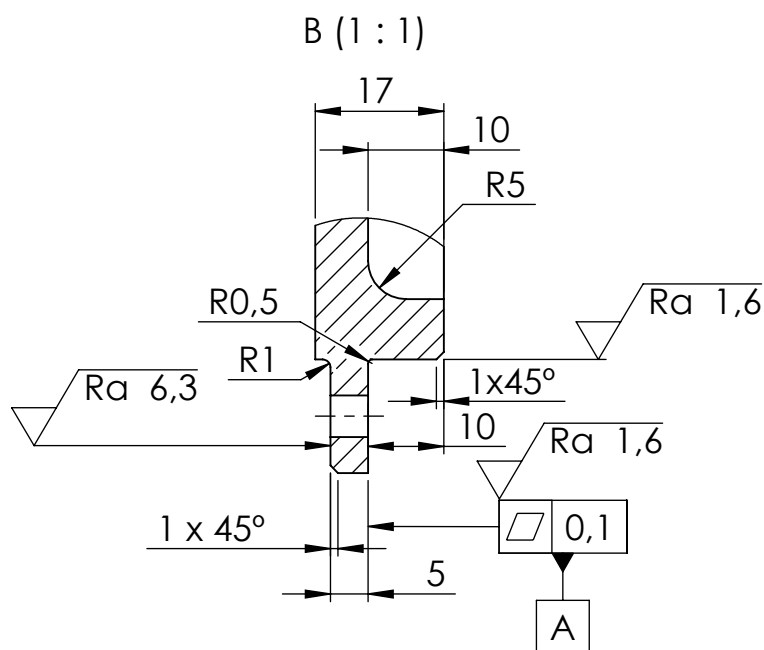
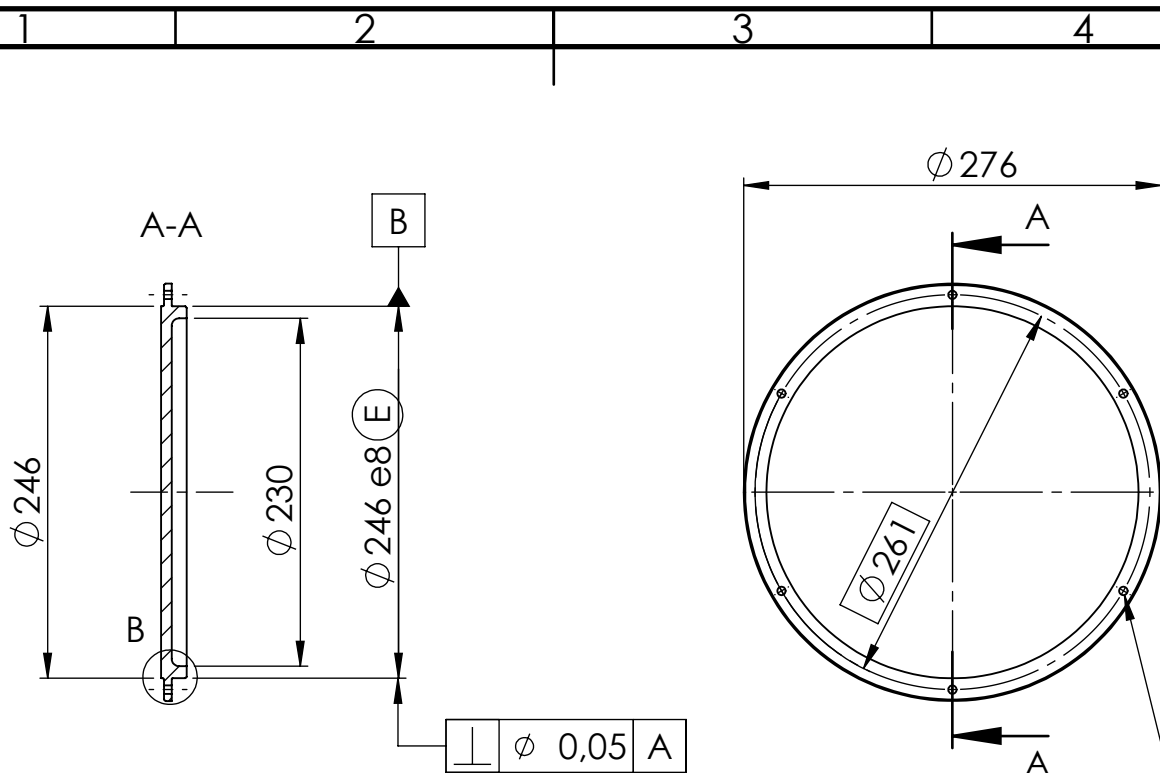




|                         |         |                            |  |   |                          |
|-------------------------|---------|----------------------------|--|---|--------------------------|
| 43                      | 1       | Veio saída                 | Aco 42 C/Mo 4  |   |                          |
| 41                      | 2       | Retentor saída             | BASIL - 160 x 190 x 15 - Freudenberg   |   |                          |
| 41                      | 1       | Espaçador saída            | Aco S152   |   |                          |
| 40                      | 2       | Rolamento de esteras       | 4832 [140 x 200 x 20] - Koyo   |   |                          |
| 39                      | 1       | Anel elástico              | DIN 472 - 200 x 4  |   |                          |
| 38                      | 2       | Anel elástico              | DIN 471 - 160 x 4  |   |                          |
| 37                      | 2       | Pino elástico              | EN ISO 8752 - 10 x 90 - S1   |   |                          |
| 36                      | 4       | Paraf. cab. hexagonal      | ISO 4014 - M16 x 100 - 8.8   |   |                          |
| 35                      | 2       | Rolamento auto-compensador | 24024 RH [120 x 180 x 60] - Koyo   |   |                          |
| 34                      | 2       | Veio pinhão                | Aço 18 CrNiMo 7 - 6  |   |                          |
| 33                      | 35      | Lubrificante redutor       | Kublershyt EG4 150   |   |                          |
| 32                      | 2       | Pino elástico              | EN ISO 8752 - 10 x 35 - S1   |   |                          |
| 31                      | 2       | Roda entrada [z2]          | Aço 36 CrNiMo 4  |   |                          |
| 30                      | 2       | Chaveta paralela A         | ISO/R773 - 32 x 18 x 80  |   |                          |
| 29                      | 2       | Espaçador intermédio       | Aço S152   |   |                          |
| 28                      | 2       | Rolamento auto-compensador | 23024 RH [120 x 180 x 46] - Koyo   |   |                          |
| 27                      | 2       | Rolamento cónico           | 32017JR (85 x 130 x 29) - Koyo   |   |                          |
| 26                      | 1       | Espaçador roda Z1          | Aço S152   |   |                          |
| 25                      | 1       | Pinhão [z1]                | Aço 18 CrNiMo 7 - 6  |   |                          |
| 24                      | 1       | Chaveta paralela A         | ISO/R 773 - 25 x 14 x 70 - S160  |   |                          |
| 23                      | 1       | Espaçador entrada          | Aço S152   |   |                          |
| 22                      | 1       | Retentor entrada           | BAUSIUX - 85 x 110 x 12 - Freudenberg  |   |                          |
| 21                      | 1       | Veio entrada               | Aco 42 C/Mo 4  |   |                          |
| 20                      | 1       | Chaveta paralela A         | ISO/R773 - 20 x 12 x 100 - S160  |   |                          |
| 19                      | 2       | Tampa intern. entrada      | Ferro fundido nodular (GGG35)  |   |                          |
| 18                      | 2       | Paraf. cab. hexagonal      | ISO 4014 - M16 x 150 - 8.8   |   |                          |
| 17                      | 1       | Tampa entrada              | Ferro fundido nodular (GGG35)  |   |                          |
| 16                      | 1       | Postico                    | Ferro fundido nodular (GGG50)  |   |                          |
| 15                      | 2       | Tampão                     | GN 749 - M48 x 2 - A   |   |                          |
| 14                      | 1       | Roda saída (z6)            | Aco 36 CrNiMo 4  |   |                          |
| 13                      | 12      | Paraf. cab. cil. oco hex.  | ISO 4742 - M5 x 12 - 8.8   |   |                          |
| 12                      | 2       | Indicador de nível         | GN 7431 - 18 - M26 x 1,5 - AS  |   |                          |
| 11                      | 1       | Bujão de água              | GN 749 - M33 x 2 - A   |   |                          |
| 10                      | 36      | Paraf. cab. cil. oco hex.  | ISO 4742 - M8 x 20 - 8.8   |   |                          |
| 9                       | 1       | Tampa saída                | Ferro fundido nodular (GGG35)  |   |                          |
| 8                       | 36      | Paraf. cab. hexagonal      | ISO 4017 - M16 x 60 - 8.8  |   |                          |
| 7                       | 2       | Tampa intern. saída        | Ferro fundido nodular (GGG35)  |   |                          |
| 6                       | 48      | Porca hexagonal            | ISO 4032 - M16 - 8   |   |                          |
| 5                       | 1       | Melo corpo inferior        | Ferro fundido nodular (GGG50)  |   |                          |
| 4                       | 10      | Paraf. cab. hexagonal      | ISO 4017 - M16 x 180 - 8.8   |   |                          |
| 3                       | 1       | Melo corpo superior        | Ferro fundido nodular (GGG50)  |   |                          |
| 2                       | 2       | Tampa superior             | Ferro fundido nodular (GGG35)  |   |                          |
| 1                       | 1       | Bujão de água              | SMW 80 - BA - F40 - 350mm  |   |                          |
| Ref. Caixa              | Qtd.    | Unid.                      | Nome de peça   | Dados técnicos, designação                        | Obs.                     |
| 135                     |         |                            | Toleranciamento ISO 8015<br>Tolerâncias gerais ISO 2768; mpt.<br>Tolerâncias gerais ISO 8062 - DCTO 10 - G/C15 S | Mais do que com unidade<br><br>1365 kg            |                          |
| Código:                 | 2146161 |                            | Nome: Hitec Bateria 300Ah/mg   |   |                          |
| Verificação:            |         |                            |  | Nota de desmonte                                  |                          |
| Aprovação:              |         |                            |  | ISO 9407 - A1 - OP100 - F                         |                          |
| Assinatura responsável: |         |                            | Assinatura técnico:  | Desenho de conjunto                               | Desenho de detalhe       |
| Assinatura legal:       |         |                            |  | Esta é uma cópia                                  | Número: 2019517-17       |
| HELIP                   |         |                            |  | Regulador de velocidade de 375 kW com power split | Em curso de aprovação    |
|                         |         |                            |  |   | Elaborado por: J. L. P.  |
|                         |         |                            |  |   | Comprovado por: J. L. P. |
|                         |         |                            |  |   | Revisado por: J. L. P.   |



## E.2 Desenhos de definição



Escala  
1 : 5



Toleranciamento ISO 8015  
Tolerâncias gerais ISO 2768 - mH  
Tolerâncias gerais ISO 8062 - DCTG 10 - GCTG 5

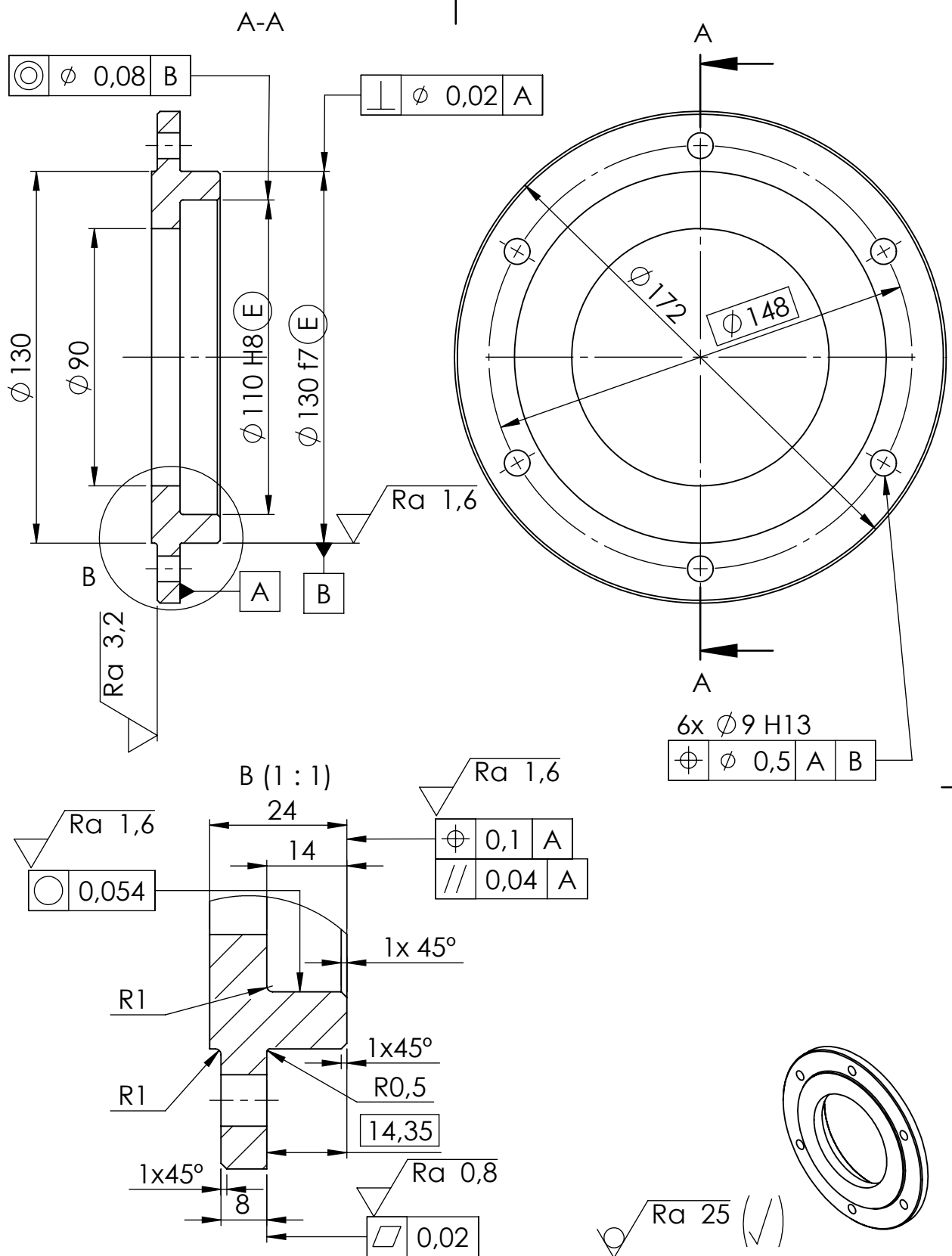
MATERIAL: Ferro fundido nodular (GGG35)

Massa: 3,3 Kg

|            |                                  |
|------------|----------------------------------|
| Data       | Nome                             |
| Realizado  | 2019-05-19                       |
| Verificado | Mauro Filipe Rodrigues Domingues |
| Aprovado   |                                  |

Folha de desenho  
ISO 5457-A4-OP100-F

|                                   |                    |   |  |
|-----------------------------------|--------------------|---|--|
| Departamento responsável<br>DEMec | Referência técnica | Tipo de documento<br>Desenho de definição                                   | Estado do documento<br>Em curso de aprovação |
| Proprietário legal<br>FEUP        |                    | Título; Título adicional<br>Tampa superior<br>Componente 2 do des. conjunto | Número<br>20190519-2RV                       |
|                                   |                    |   | Rev. A                                       |
|                                   |                    |   | Data de edição<br>2019-05-19                 |
|                                   |                    |   | Língua<br>pt                                 |
|                                   |                    |   | Folha<br>1/1                                 |



Escala  
1:2



Toleranciamento ISO 8015  
Tolerâncias gerais ISO 2768 - mH  
Tolerâncias gerais ISO 8062 - DCTG 10 - GCTG 5

MATERIAL: Ferro fundido nodular (GGG35)

Massa: 1,5 Kg

Data

Nome

Realizado

2019-05-19

Mauro Filipe Rodrigues Domingues

Verificado

Aprovado

Folha de desenho

ISO 5457-A4-OP100-F

Departamento responsável  
DEMec

Referência técnica

Tipo de documento  
Desenho de definição

Estado do documento  
Em curso de aprovação

Proprietário legal

FEUP

Título; Título adicional  
Tampa entrada

Número

20190519-17RV

Rev.

A

Data de edição

Língua

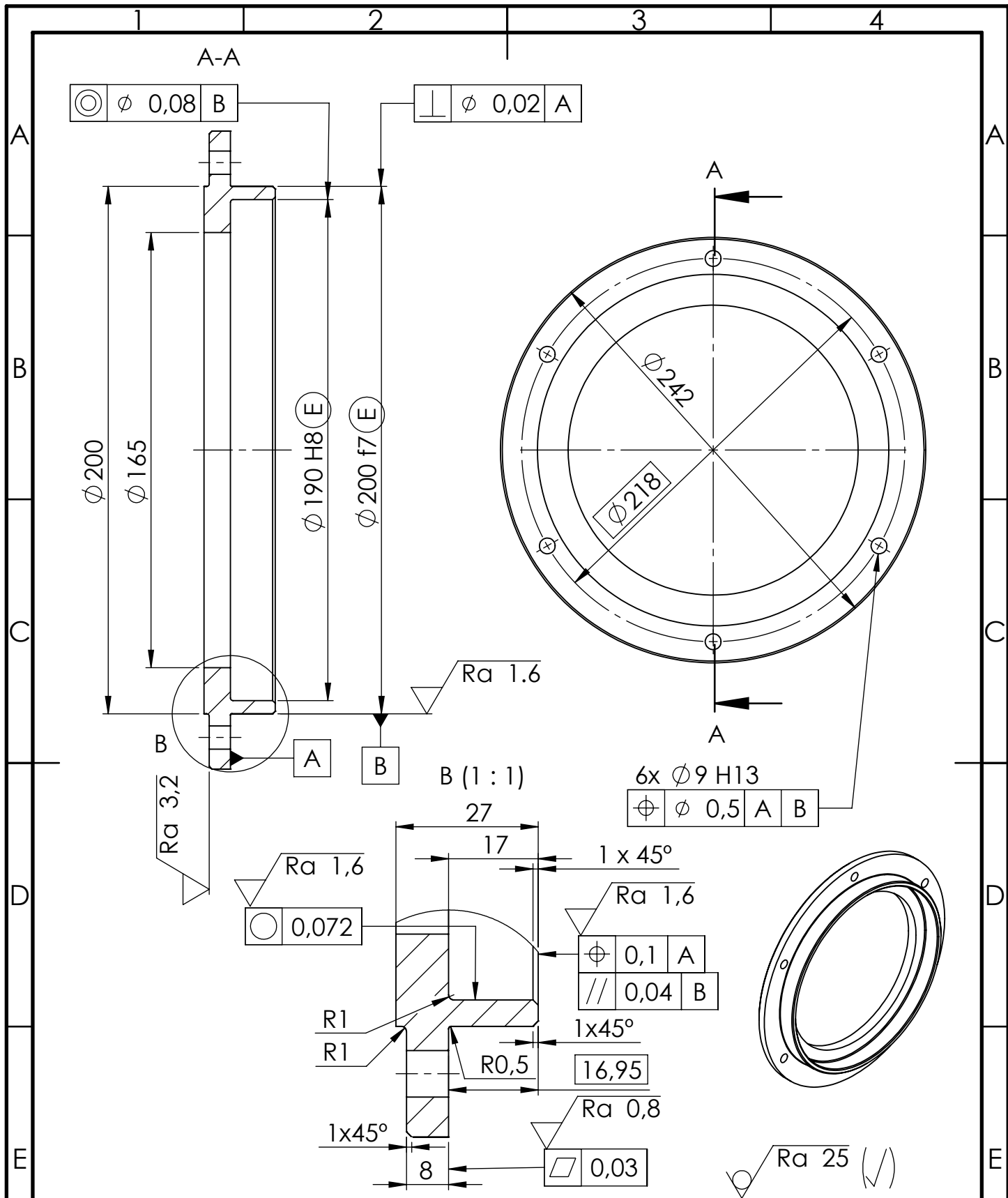
Folha


2019-05-19

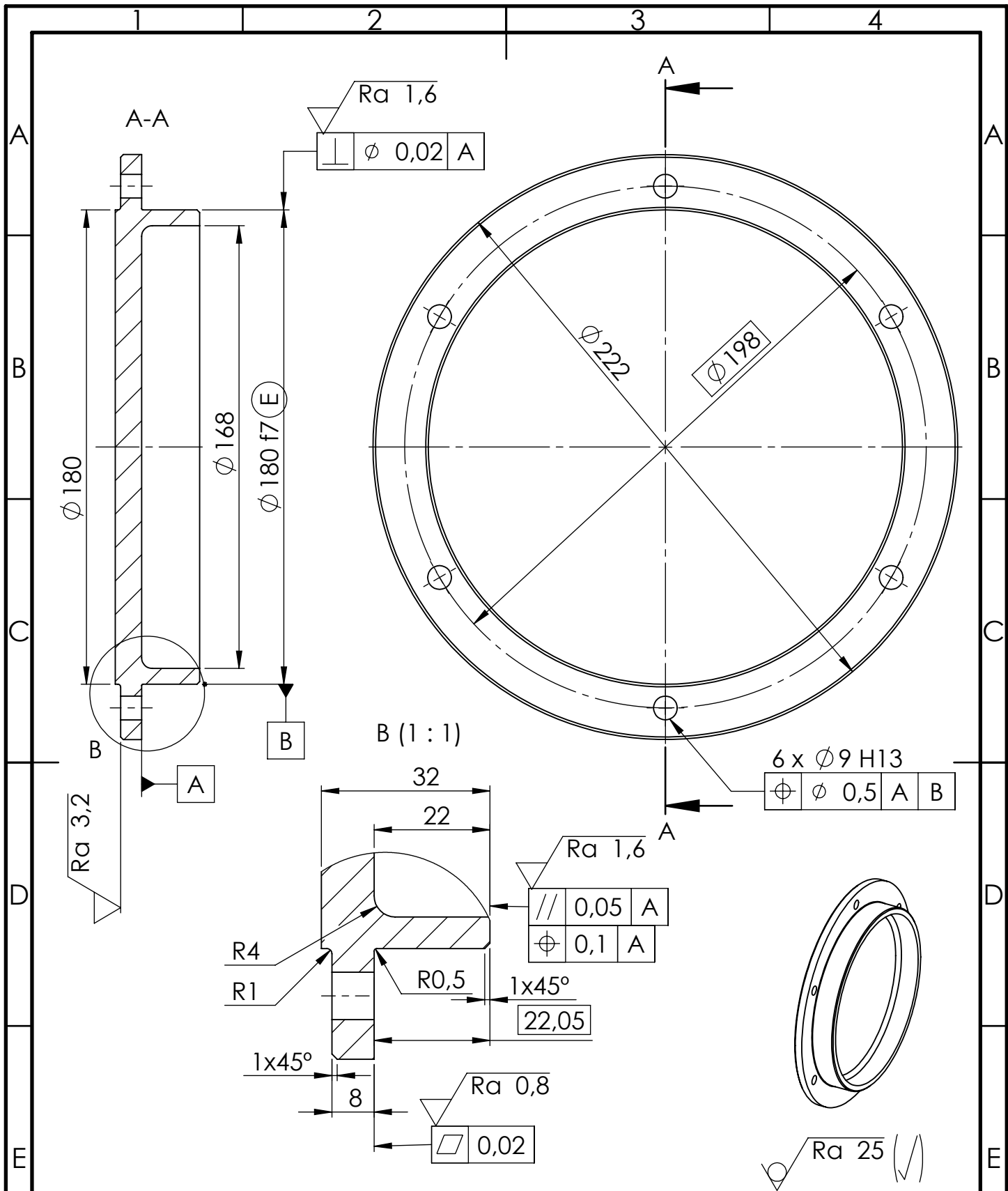
pt

1/1

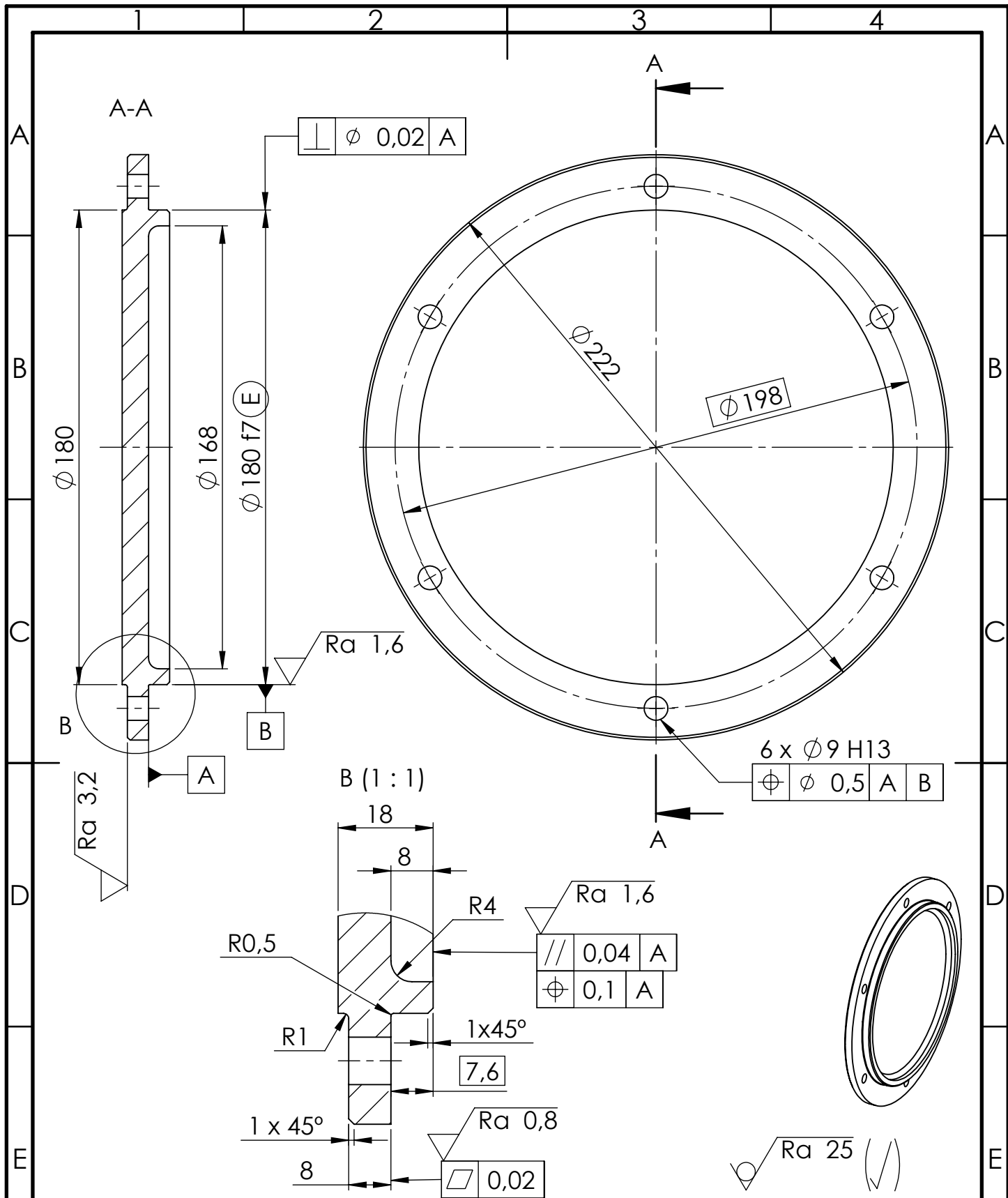
Componente 17 do des. conjunto



|  |  |  |   |  |
|--|--|--|---|--|
| Escala<br>1 : 2<br>                                   | Toleranciamento ISO 8015<br>Tolerâncias gerais ISO 2768 - mH<br>Tolerâncias gerais ISO 8062 - DCTG 10 - GCTG 5 |  | MATERIAL: Ferro fundido nodular (GGG35)<br><br>Massa: 1,8 Kg  |  |
| Realizado<br>2019-05-19<br>Verificado<br>Aprovado  | Data<br>2019-05-19   | Nome<br>Mauro Filipe Rodrigues Domingues | Folha de desenho<br>ISO 5457-A4-OP100-F   |  |
| Departamento responsável<br>DEMec<br><br>Proprietário legal<br>FEUP  | Referência técnica   |  | Tipo de documento<br>Desenho de definição<br><br>Título; Título adicional<br>Tampa saída<br>Componente 9 do des. conjunto |  |
| Estado do documento<br>Em curso de aprovação<br><br>Número 20190519-9RV<br>Rev. A    Data de edição 2019-05-19    Língua pt    Folha 1/1 |  |  |   |  |

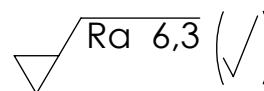
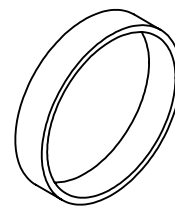
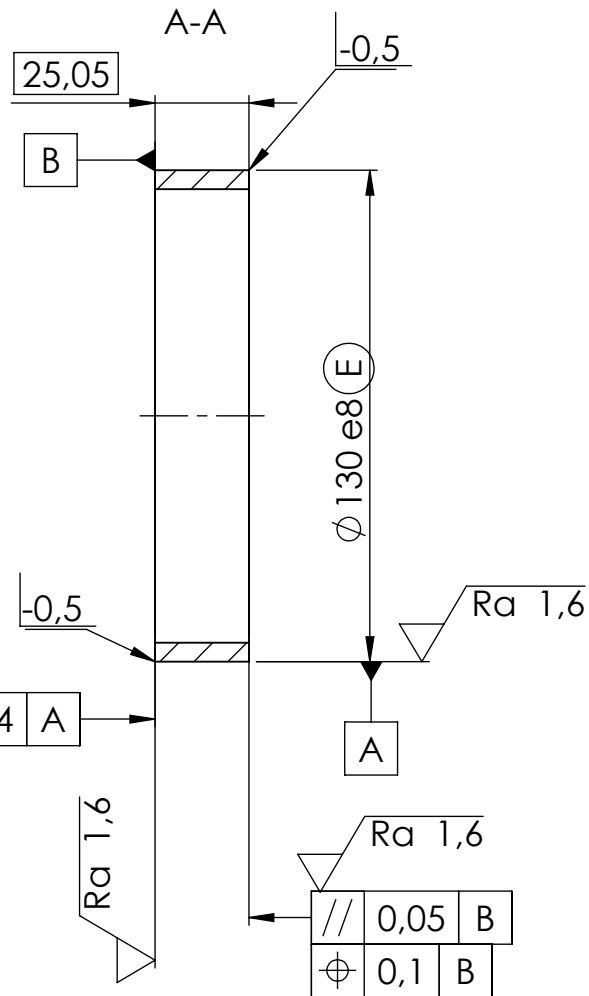
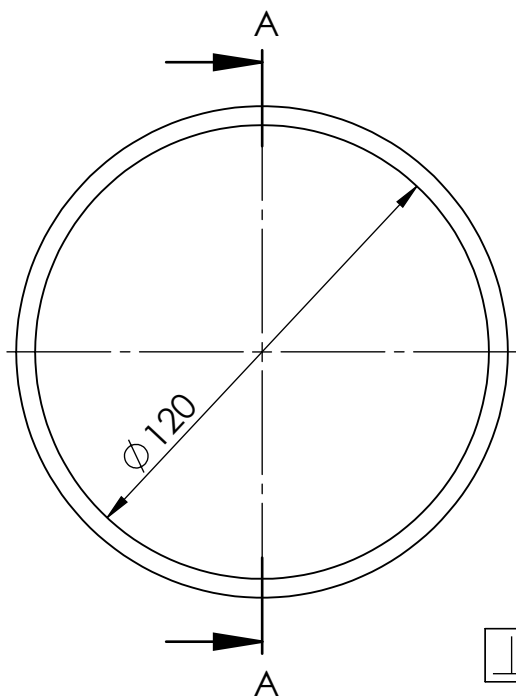


|   |  |  |  |   |
|---|--|--|--|---|
| Escala<br>1 : 2<br><br>   | Toleranciamento ISO 8015<br>Tolerâncias gerais ISO 2768 - m5<br>Tolerâncias gerais ISO 8062 - DCTG 10 - GCTG 5 |  | MATERIAL: Ferro fundido nodular (GGG35)<br><br>Massa: 2,7 Kg |   |
| Realizado<br>2019-05-19<br>Verificado<br>Aprovado                   | Data<br>2019-05-19   | Nome<br>Mauro Filipe Rodrigues Domingues   | Folha de desenho<br>ISO 5457-A4-OP100-F                      |   |
| Departamento responsável<br>DEMec<br><br>Proprietário legal<br>FEUP | Referência técnica   | Tipo de documento<br>Desenho de definição<br><br>Título; Título adicional<br>Tampa intern. entrada<br><br>Componente 19 do des. conjunto |  | Estado do documento<br>Em curso de aprovação<br><br>Número 20190519-19RV<br>Rev. A    Data de edição 2019-05-19    Língua pt    Folha 1/1 |

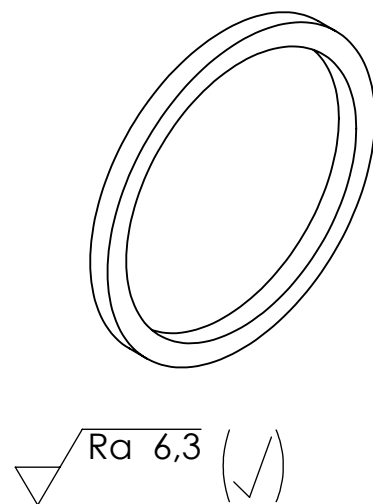
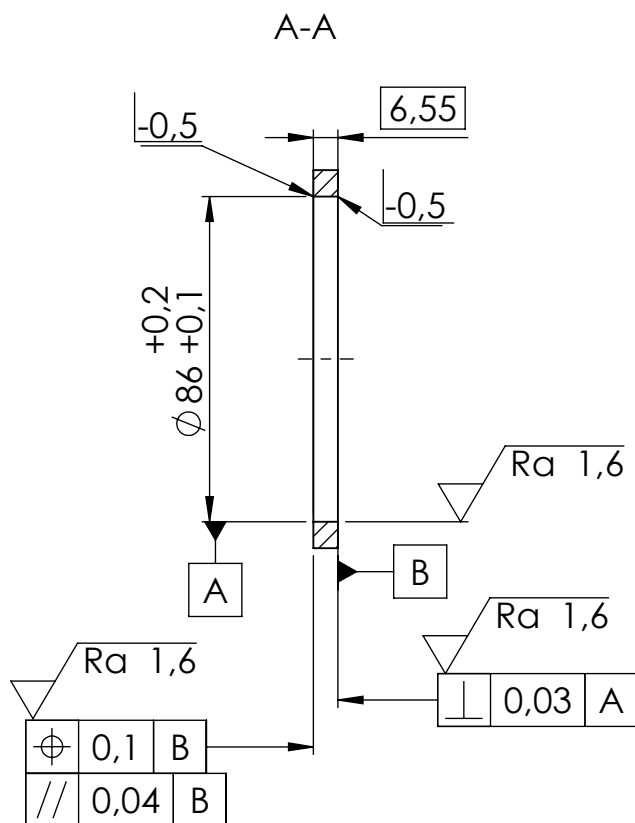
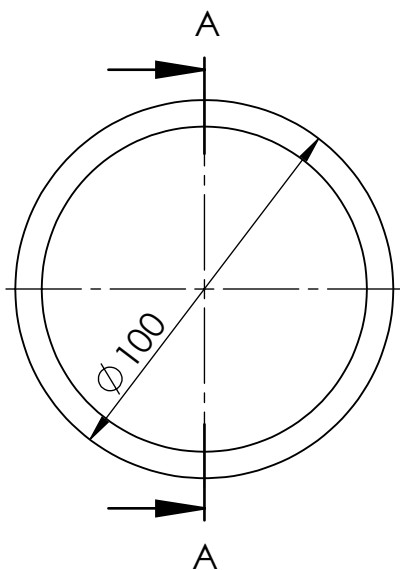


|   |  |  |  |   |
|---|--|--|--|---|
| Escala<br>1 : 2<br>   | Toleranciamento ISO 8015<br>Tolerâncias gerais ISO 2768 - mH<br>Tolerâncias gerais ISO 8062 - DCTG 10 - GCTG 5 |  | MATERIAL: Ferro fundido nodular (GGG35)<br><br>Massa: 2,4 Kg |   |
| Realizado<br>2019-05-19<br>Verificado<br>Aprovado                   | Data<br>2019-05-19   | Nome<br>Mauro Filipe Rodrigues Domingues   | Folha de desenho<br>ISO 5457-A4-OP100-F                      |   |
| Departamento responsável<br>DEMec<br><br>Proprietário legal<br>FEUP | Referência técnica   | Tipo de documento<br>Desenho de definição<br><br>Título; Título adicional<br>Tampa interm. saída<br>Componente 7 do des.conjunto |  | Estado do documento<br>Em curso de aprovação<br>Número 20190519-7RV<br>Rev. A Data de edição 2019-05-19 Língua pt Folha 1/1 |





|                                   |  |   |                                    |  |
|-----------------------------------|--|---|------------------------------------|--|
| Escala<br>1 : 2<br>               | Toleranciamento ISO 8015<br>Tolerâncias gerais ISO 2768 - mH |   | MATERIAL: Aço St52<br>Massa: 380 g |  |
|                                   | Data   | Nome  |                                    |  |
| Realizado                         | 2019-05-19   | Mauro Filipe Rodrigues Domingues              |                                    |  |
| Verificado                        |  |   | Folha de desenho                   |  |
| Aprovado                          |  |   | ISO 5457-A4-OP100-F                |  |
| Departamento responsável<br>DEMec | Referência técnica   | Tipo de documento<br>Desenho de definição     |                                    | Estado do documento<br>Em curso de aprovação                           |
| Proprietário legal<br>FEUP        |  | Título; Título adicional<br>Espaçador entrada |                                    | Número<br>20190519-23RV  |
|                                   |  | Componente 23 do des. conjunto                |                                    | Rev. A<br>Data de edição<br>14-05-2019<br>Língua<br>pt<br>Folha<br>1/1 |



Escala  
1 : 2



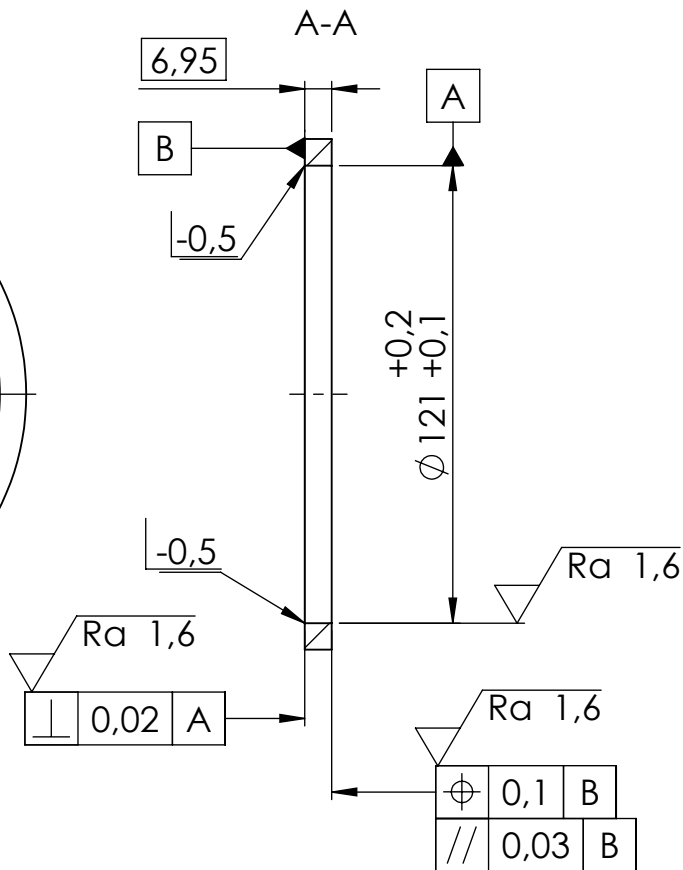
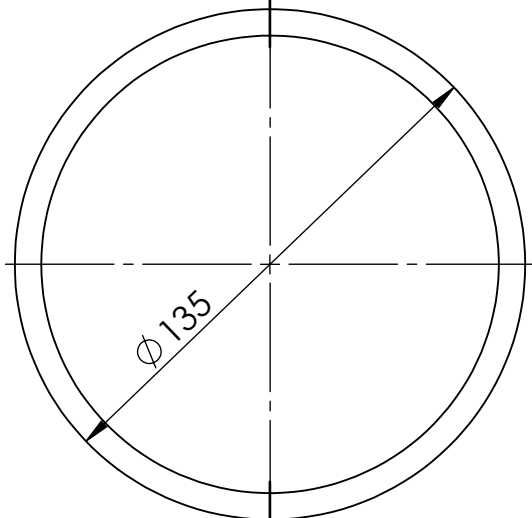
Toleranciamento ISO 8015  
Tolerâncias gerais ISO 2768 - mH

MATERIAL: Aço St52  
Massa: 104 g

|            |            |                                  |
|------------|------------|----------------------------------|
|            | Data       | Nome                             |
| Realizado  | 2019-05-19 | Mauro Filipe Rodrigues Domingues |
| Verificado |            |                                  |
| Aprovado   |            |                                  |

Folha de desenho  
ISO 5457-A4-OP100-F

|                                   |                    |   |  |                |        |       |
|-----------------------------------|--------------------|---|--|----------------|--------|-------|
| Departamento responsável<br>DEMec | Referência técnica | Tipo de documento<br>Desenho de definição     | Estado do documento<br>Em curso de aprovação |                |        |       |
| Proprietário legal<br>FEUP        |                    | Título; Título adicional<br>Espaçador roda z1 | Número                                       | 20190519-26RV  |        |       |
|                                   |                    | Componente 26 do des. conjunto                | Rev.   | Data de edição | Língua | Folha |
|                                   |                    |   | A  | 2019-05-19     | pt     | 1/1   |



Ra 6,3 (✓)

Escala  
1:2



Toleranciamento ISO 8015  
Tolerâncias gerais ISO 2768 - mH

MATERIAL: Aço St52

Massa: 157 g

Data

Nome

Realizado

2019-05-19

Mauro Filipe Rodrigues Domingues

Verificado

Aprovado

Folha de desenho

ISO 5457-A4-OP100-F

Departamento responsável  
DEMec

Referência técnica

Tipo de documento  
Desenho de definição

Estado do documento  
Em curso de aprovação

Proprietário legal

FEUP

Título; Título adicional  
Espaçador intermédio

Componente 29 do des. conjunto

Número

20190519-29RV

Rev.

A

Data de edição

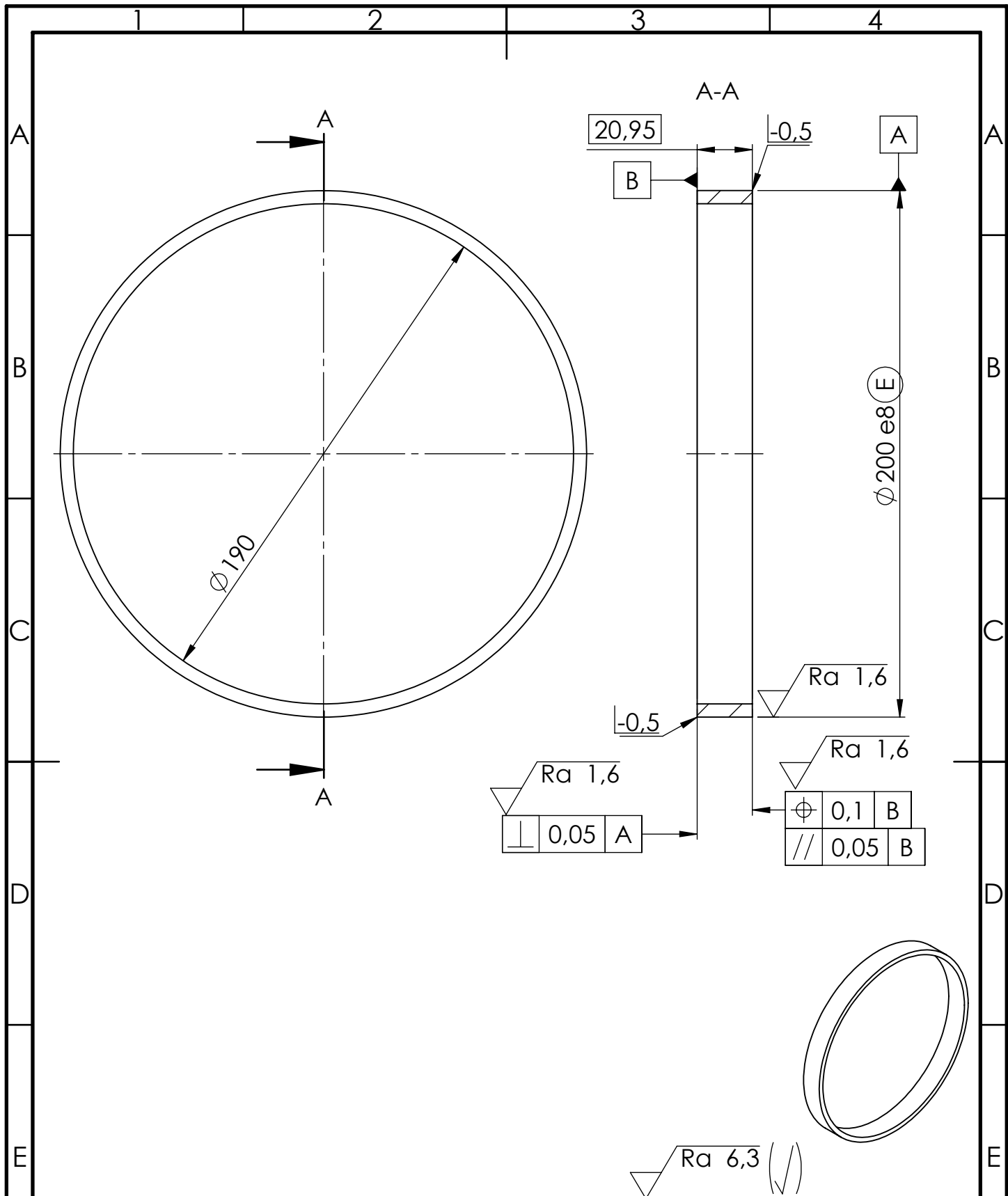
2019-05-19

Língua

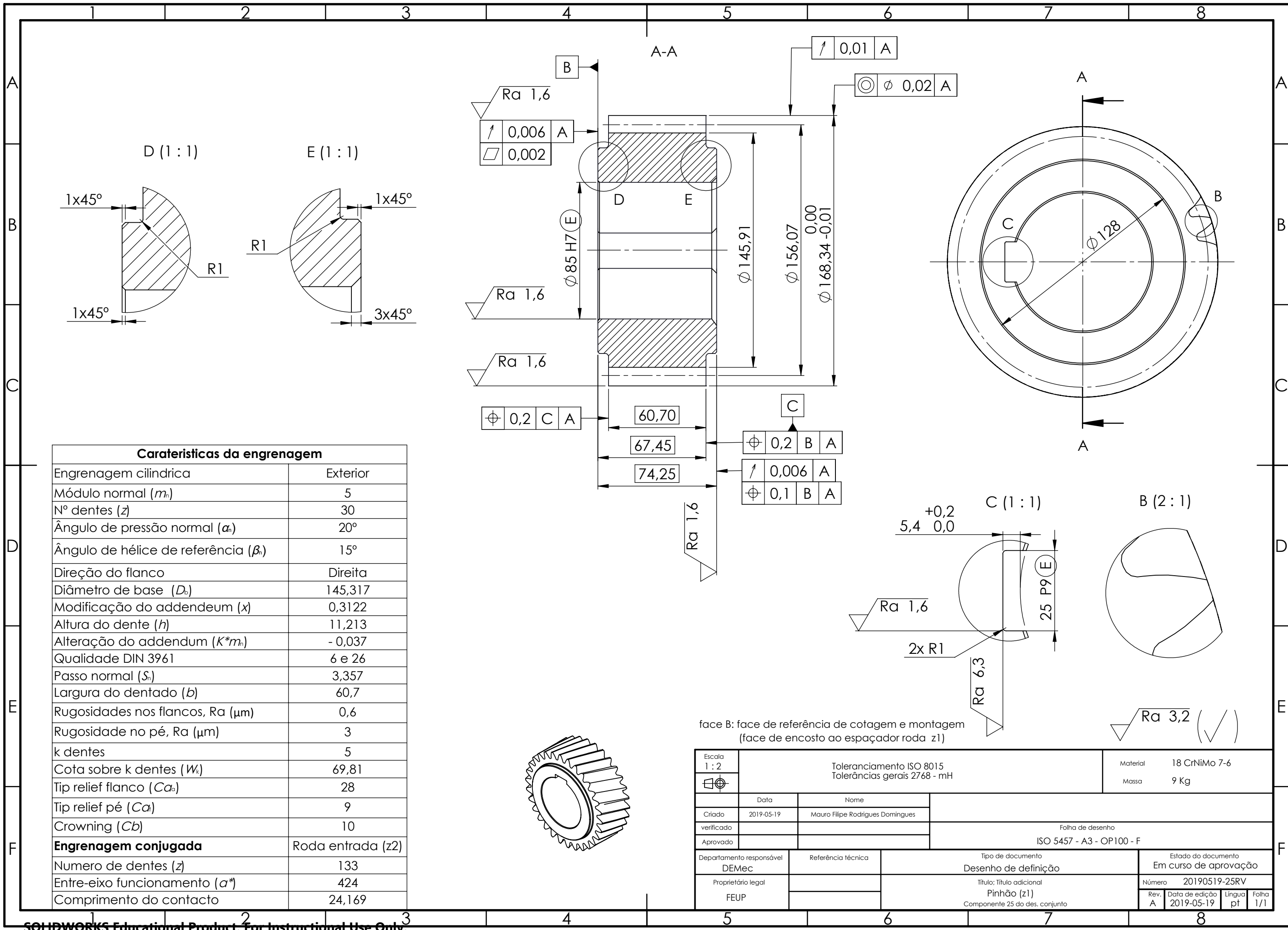
pt

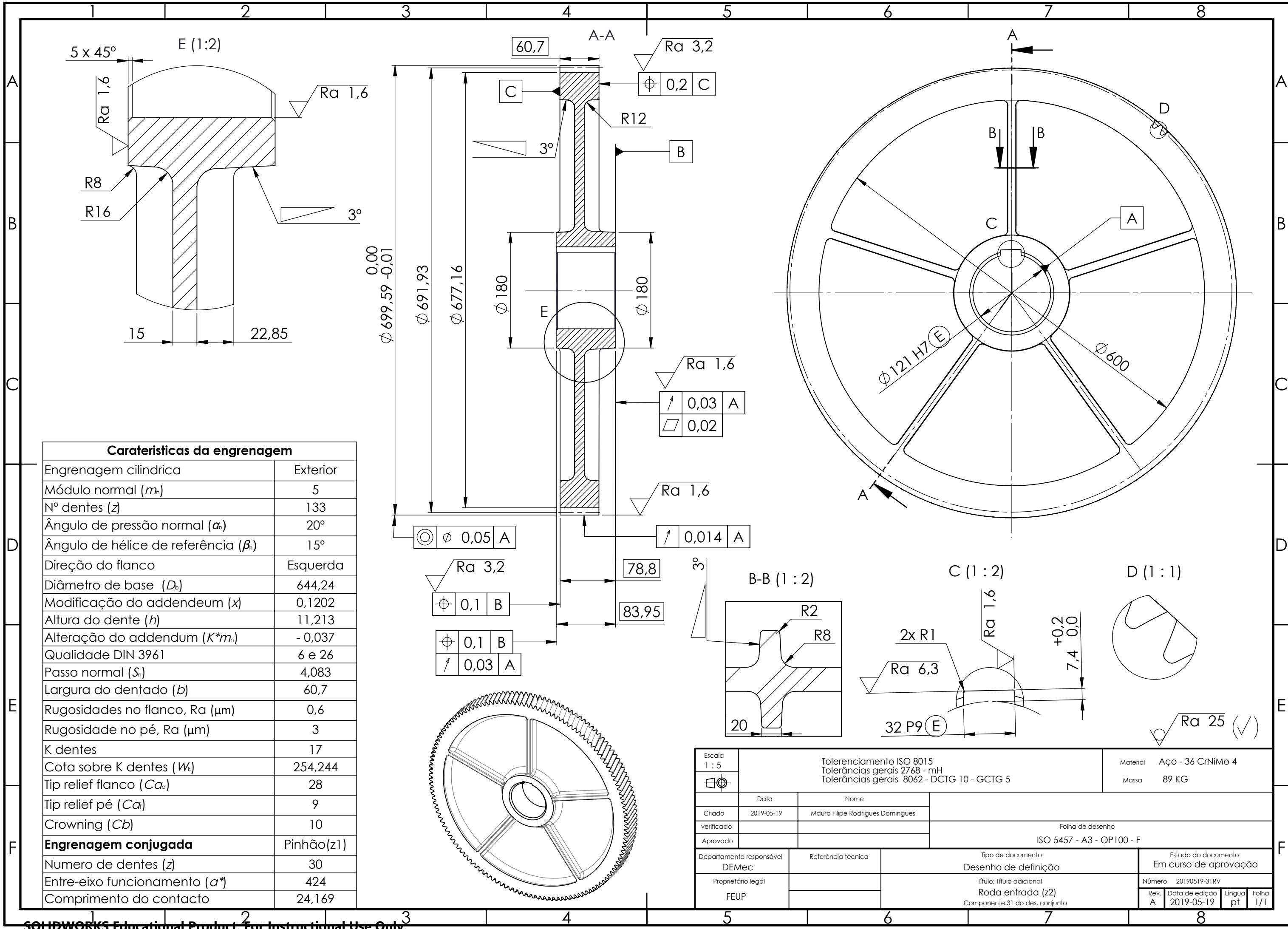
Folha

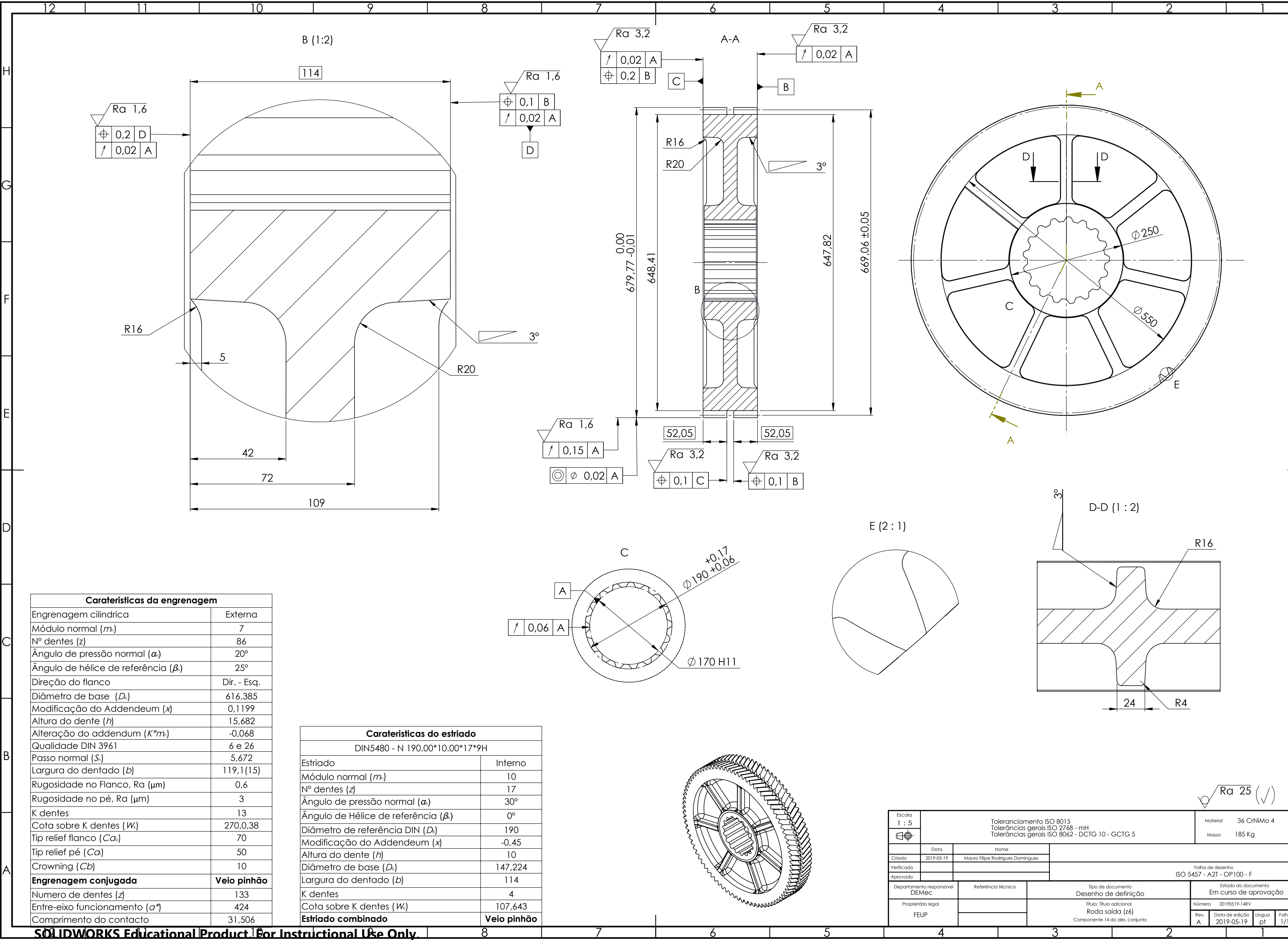
1/1



|                                   |  |   |  |   |
|-----------------------------------|--|---|--|---|
| Escala<br>1 : 2<br>               | Toleranciamento ISO 8015<br>Tolerâncias gerais ISO 2768 - mH |   | MATERIAL: Aço St52<br><br>Massa: 502 g |   |
|                                   | Data   | Nome  |  |   |
| Realizado                         | 2019-05-19   | Mauro Filipe Rodrigues Domingues            |  |   |
| Verificado                        |  |   | Folha de desenho                       |   |
| Aprovado                          |  |   | ISO 5457-A4-OP100-F                    |   |
| Departamento responsável<br>DEMec | Referência técnica   | Tipo de documento<br>Desenho de definição   |  | Estado do documento<br>Em curso de aprovação                  |
| Proprietário legal<br>FEUP        |  | Título; Título adicional<br>Espaçador saída |  | Número 20190519-41RV  |
|                                   |  | Componente 41 do des. conjunto              |  | Rev. A<br>Data de edição 2019-05-19<br>Língua pt<br>Folha 1/1 |







| Caraterísticas da engrenagem                 |                    |
|--|--------------------|
| Engrenagem cilíndrica                        | Externa            |
| Módulo normal ( $m_n$ )                      | 7                  |
| Nº dentes ( $z$ )                            | 86                 |
| Ângulo de pressão normal ( $\alpha_n$ )      | 20°                |
| Ângulo de hélice de referência ( $\beta_r$ ) | 25°                |
| Direção do flanco                            | Dir. - Esq.        |
| Diâmetro de base ( $D_b$ )                   | 616,385            |
| Modificação do Addendum ( $x$ )              | 0,1199             |
| Altura do dente ( $h$ )                      | 15,682             |
| Alteração do addendum ( $K*m_n$ )            | -0,068             |
| Qualidade DIN 3961                           | 6 e 26             |
| Passo normal ( $S_n$ )                       | 5,672              |
| Largura do dentado ( $b$ )                   | 119,1 (15)         |
| Rugosidade no Flanco, Ra ( $\mu m$ )         | 0,6                |
| Rugosidade no pé, Ra ( $\mu m$ )             | 3                  |
| K dentes                                     | 13                 |
| Cota sobre K dentes ( $W_k$ )                | 270,038            |
| Tip relief flanco ( $Ca_f$ )                 | 70                 |
| Tip relief pé ( $Ca_p$ )                     | 50                 |
| Crowning ( $Cb$ )                            | 10                 |
| <b>Engrenagem conjugada</b>                  | <b>Veio pinhão</b> |
| Numero de dentes ( $z$ )                     | 133                |
| Entre-eixo funcionamento ( $a^*$ )           | 424                |
| Comprimento do contacto                      | 31,506             |

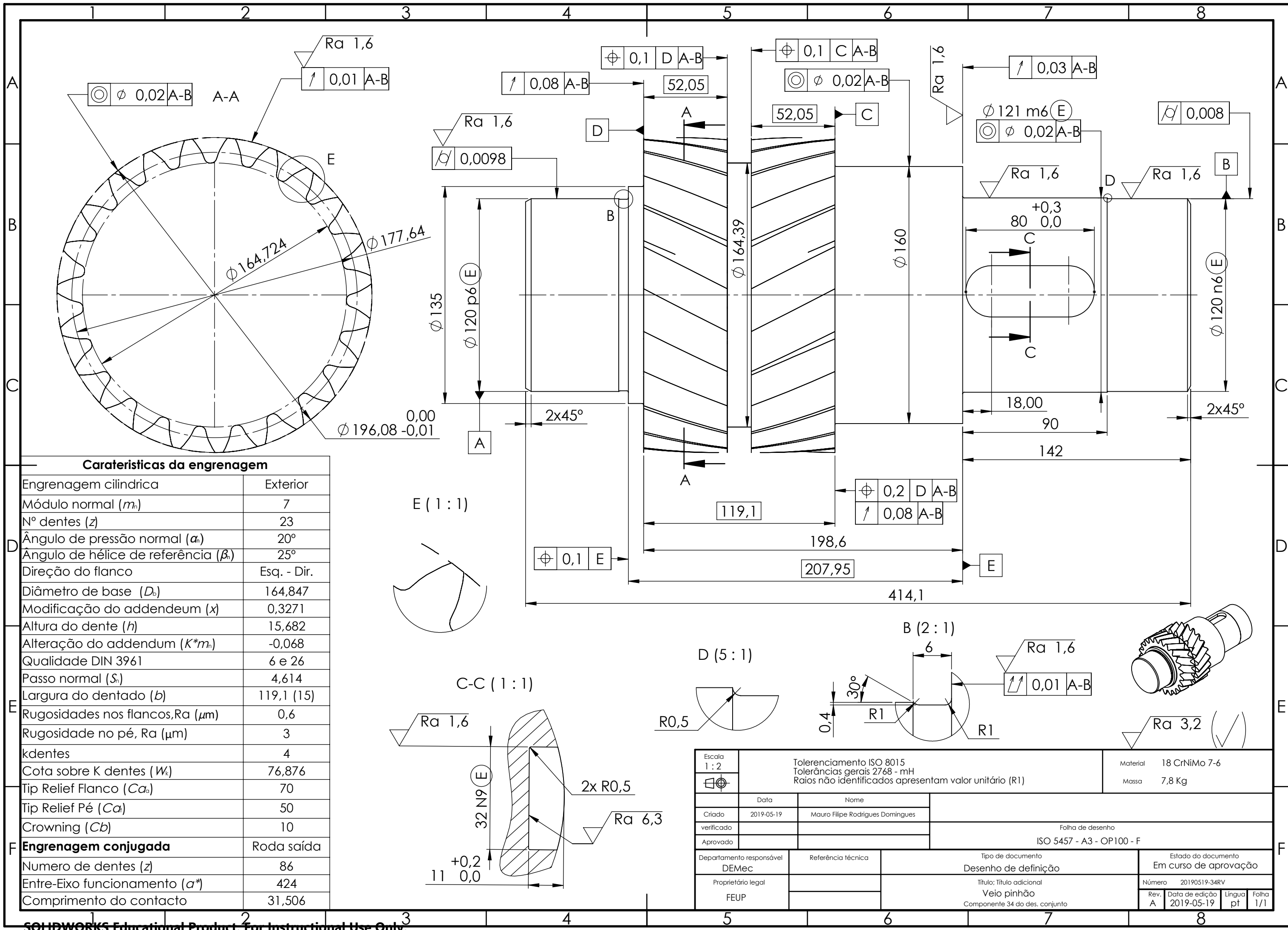
| Caraterísticas do estriado                   |                    |
|--|--------------------|
| DIN5480 - N 190.00*10.00*17*9H               |                    |
| Estriado                                     | Interno            |
| Módulo normal ( $m_n$ )                      | 10                 |
| Nº dentes ( $z$ )                            | 17                 |
| Ângulo de pressão normal ( $\alpha_n$ )      | 30°                |
| Ângulo de Hélice de referência ( $\beta_r$ ) | 0°                 |
| Diâmetro de referência DIN ( $D_k$ )         | 190                |
| Modificação do Addendum ( $x$ )              | -0,45              |
| Altura do dente ( $h$ )                      | 10                 |
| Diâmetro de base ( $D_b$ )                   | 147,224            |
| Largura do dentado ( $b$ )                   | 114                |
| K dentes                                     | 4                  |
| Cota sobre K dentes ( $W_k$ )                | 107,643            |
| <b>Estriado combinado</b>                    | <b>Veio pinhão</b> |

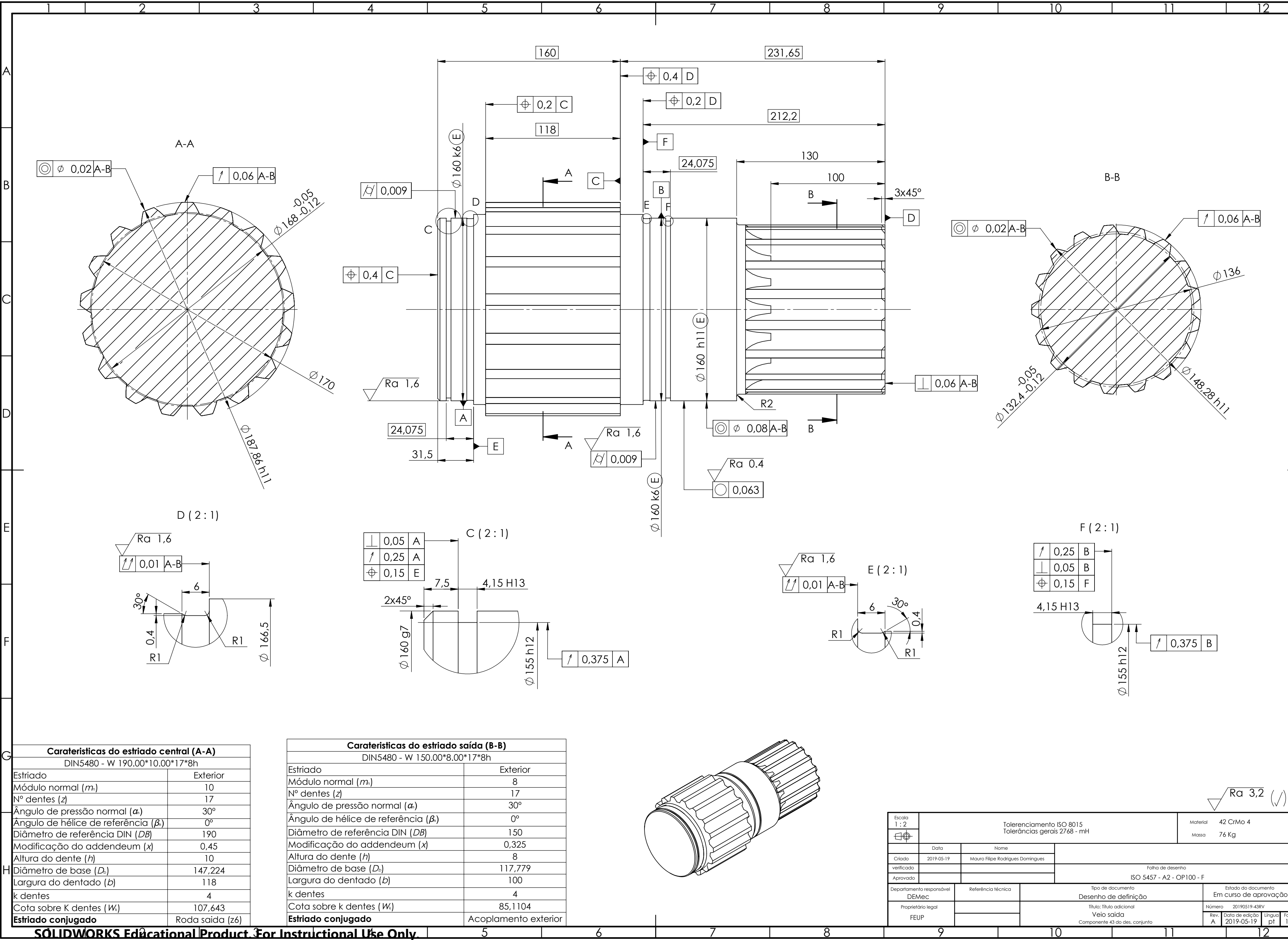
|                                   |  |   |  |
|-----------------------------------|--|---|--|
| Escala<br>1 : 5                   | Toleranciamento ISO 8015<br>Tolerâncias gerais ISO 2768 - mH<br>Tolerâncias gerais ISO 8062 - DCTG 10 - GCTG 5 |   | Material<br>36 CrNiMo 4                      |
| Verificado                        | Data<br>2019-05-19   | Nome<br>Mauro Filipe Rodrigues Domingues                                      | Massa<br>185 Kg                              |
| Aprovado                          | Folha de desenho<br>ISO 5457 - A2T - OP100 - F   |   |  |
| Departamento responsável<br>DEMec | Referência técnica   | Tipo de documento<br>Desenho de definição                                     | Estado do documento<br>Em curso de aprovação |
| Proprietário legal<br>FEUP        |  | Título; Título adicional<br>Roda saída (z6)<br>Componente 14 do des. conjunto | Número<br>20190519-14RV                      |
|                                   |  | Rev.<br>A   | Data de edição<br>2019-05-19                 |
|                                   |  |   | Língua<br>pt                                 |
|                                   |  |   | Folha<br>1/1                                 |





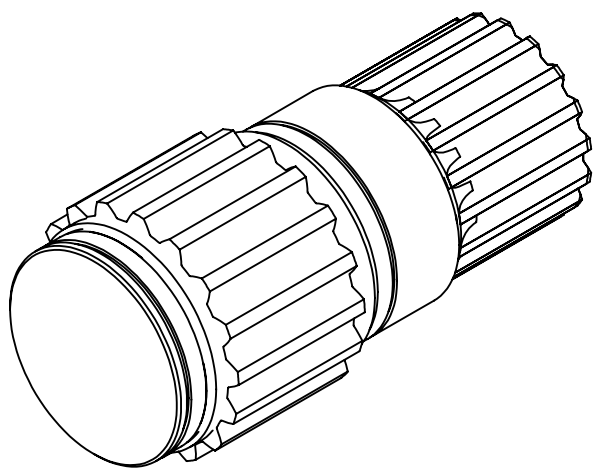




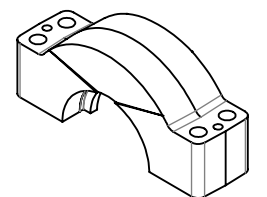
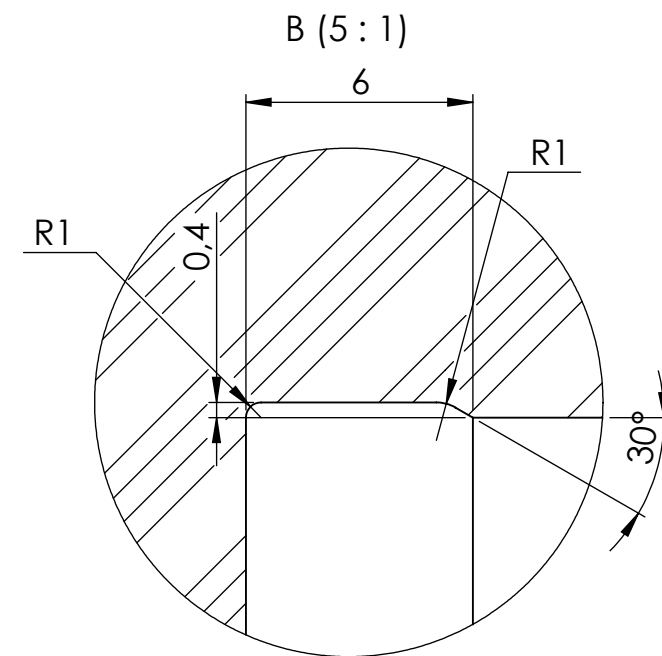
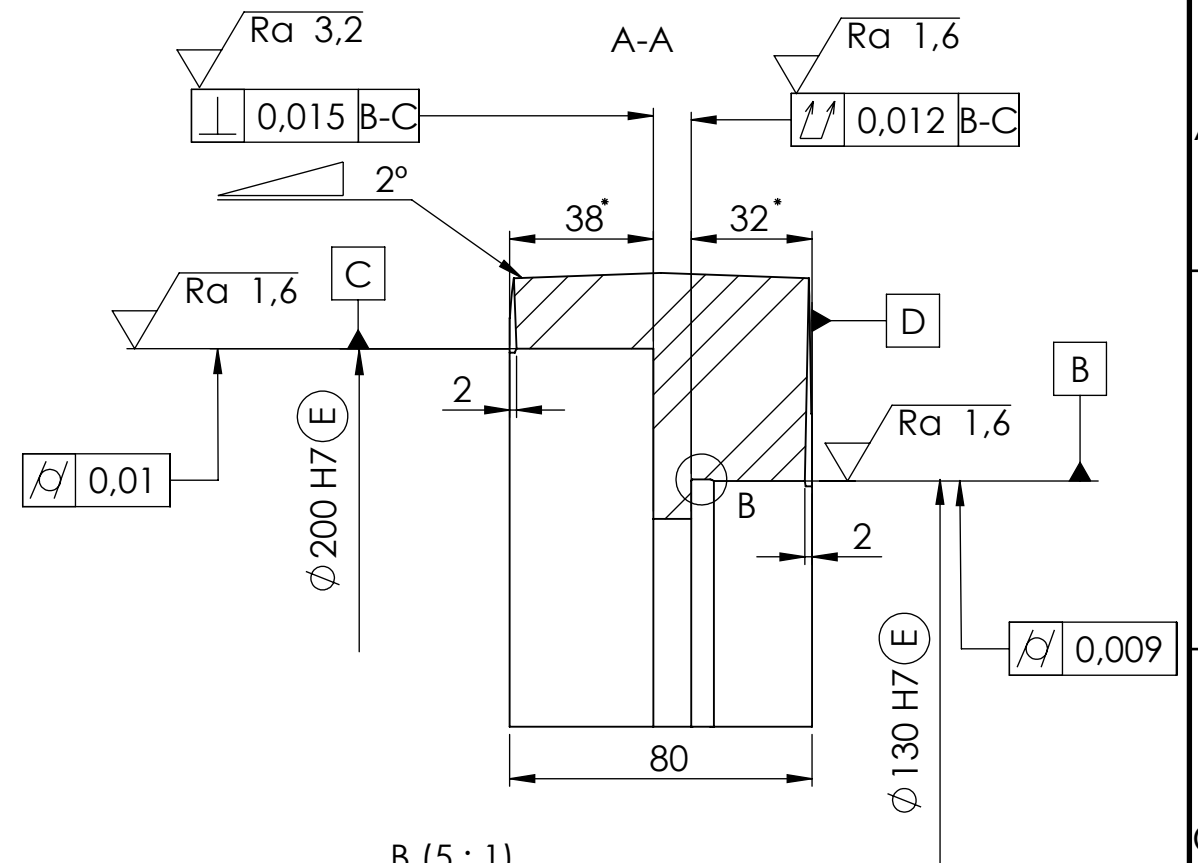
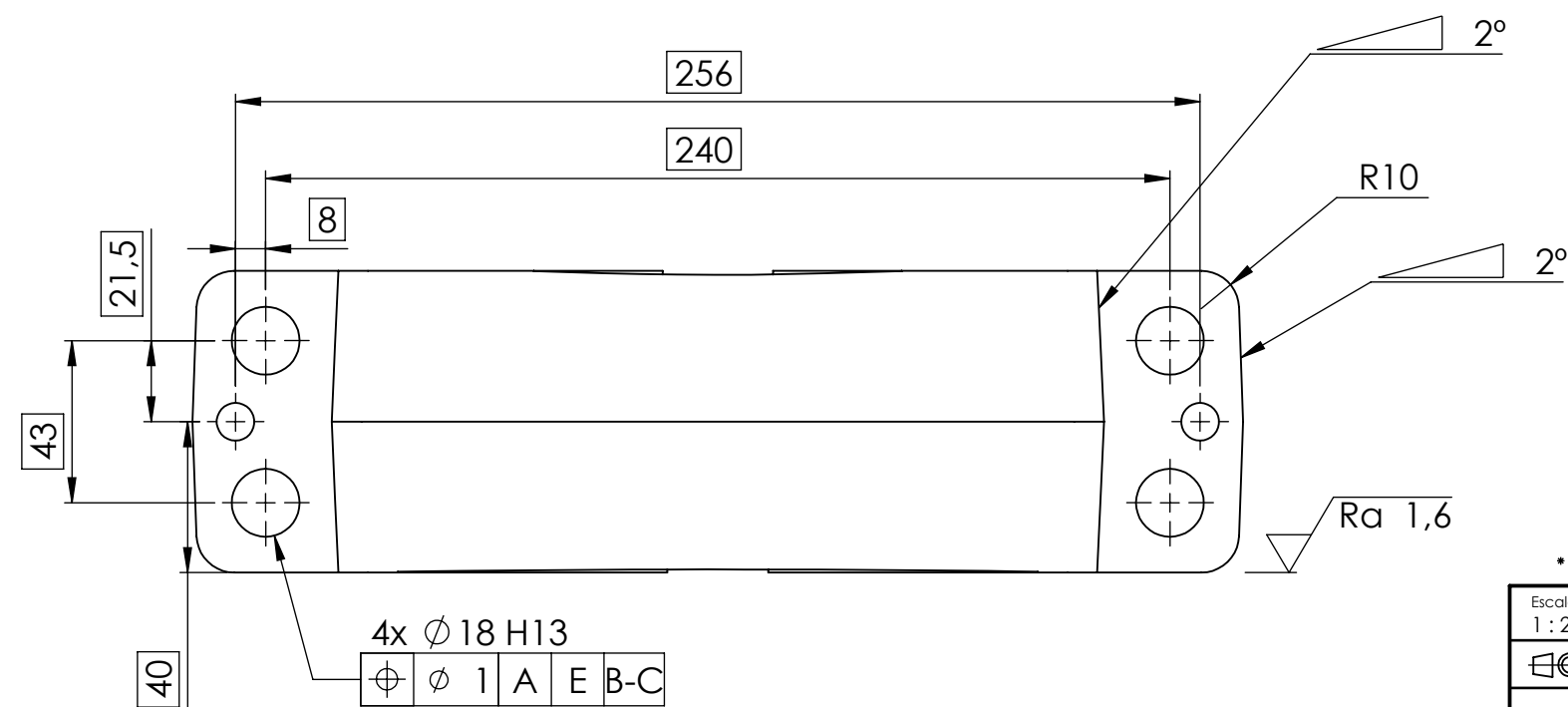
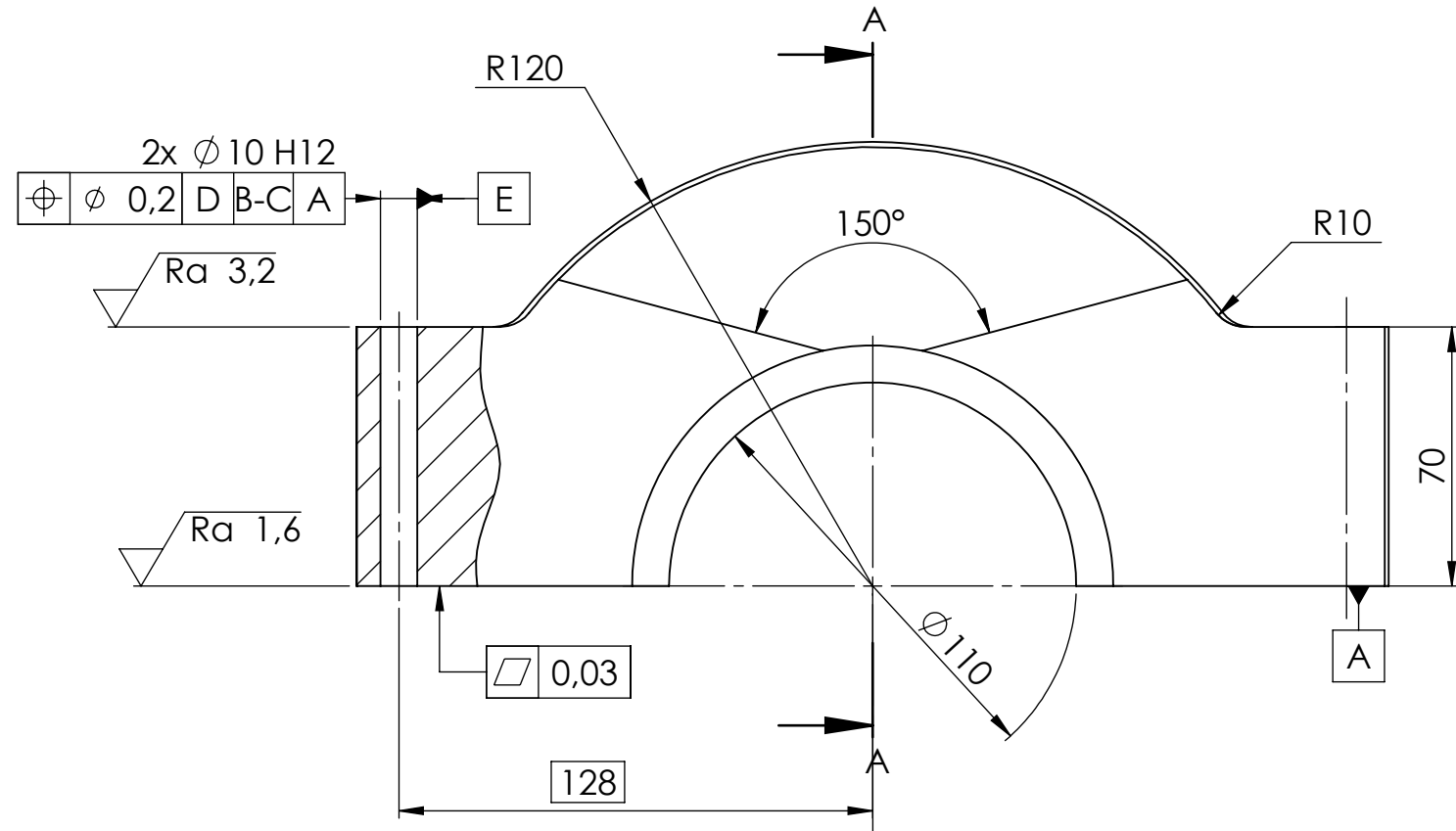


| Caraterísticas do estriado central (A-A)     |                 |
|--|-----------------|
| DIN5480 - W 190.00*10.00*17*8h               |                 |
| Estriado                                     | Exterior        |
| Módulo normal ( $m_n$ )                      | 10              |
| Nº dentes ( $z$ )                            | 17              |
| Ângulo de pressão normal ( $\alpha_n$ )      | 30°             |
| Ângulo de hélice de referência ( $\beta_r$ ) | 0°              |
| Diâmetro de referência DIN ( $DB$ )          | 190             |
| Modificação do addendum ( $x$ )              | 0,45            |
| Altura do dente ( $h$ )                      | 10              |
| Diâmetro de base ( $D_b$ )                   | 147,224         |
| Largura do dentado ( $b$ )                   | 118             |
| k dentes                                     | 4               |
| Cota sobre K dentes ( $W_k$ )                | 107,643         |
| Estriado conjugado                           | Roda saída (z6) |

| Caraterísticas do estriado saída (B-B)       |                      |
|--|----------------------|
| DIN5480 - W 150.00*8.00*17*8h                |                      |
| Estriado                                     | Exterior             |
| Módulo normal ( $m_n$ )                      | 8                    |
| Nº dentes ( $z$ )                            | 17                   |
| Ângulo de pressão normal ( $\alpha_n$ )      | 30°                  |
| Ângulo de hélice de referência ( $\beta_r$ ) | 0°                   |
| Diâmetro de referência DIN ( $DB$ )          | 150                  |
| Modificação do addendum ( $x$ )              | 0,325                |
| Altura do dente ( $h$ )                      | 8                    |
| Diâmetro de base ( $D_b$ )                   | 117,779              |
| Largura do dentado ( $b$ )                   | 100                  |
| k dentes                                     | 4                    |
| Cota sobre k dentes ( $W_k$ )                | 85,1104              |
| Estriado conjugado                           | Acoplamento exterior |




|                                |  |  |   |
|--------------------------------|--|--|---|
| Escala 1:2                     | Tolerenciamento ISO 8015<br>Tolerâncias gerais 2768 - mH |  | Material 42 CrMo 4  |
|                                |  |  | Massa 76 Kg   |
| Criado                         | 2019-05-19   | Nome Mauro Filipe Rodrigues Domingues                                    | Folha de desenho<br>ISO 5457 - A2 - OP100 - F   |
| verificado                     |  |  |   |
| Aprovado                       |  |  |   |
| Departamento responsável DEMec | Referência técnica                                       | Tipo de documento<br>Desenho de definição                                | Estado do documento<br>Em curso de aprovação  |
| Proprietário legal FEUP        |  | Título: Título adicional<br>Veio saída<br>Componente 43 do des. conjunto | Número 20190519-43RV<br>Rev. A<br>Data de edição 2019-05-19<br>Língua pt<br>Folha 1/1 |



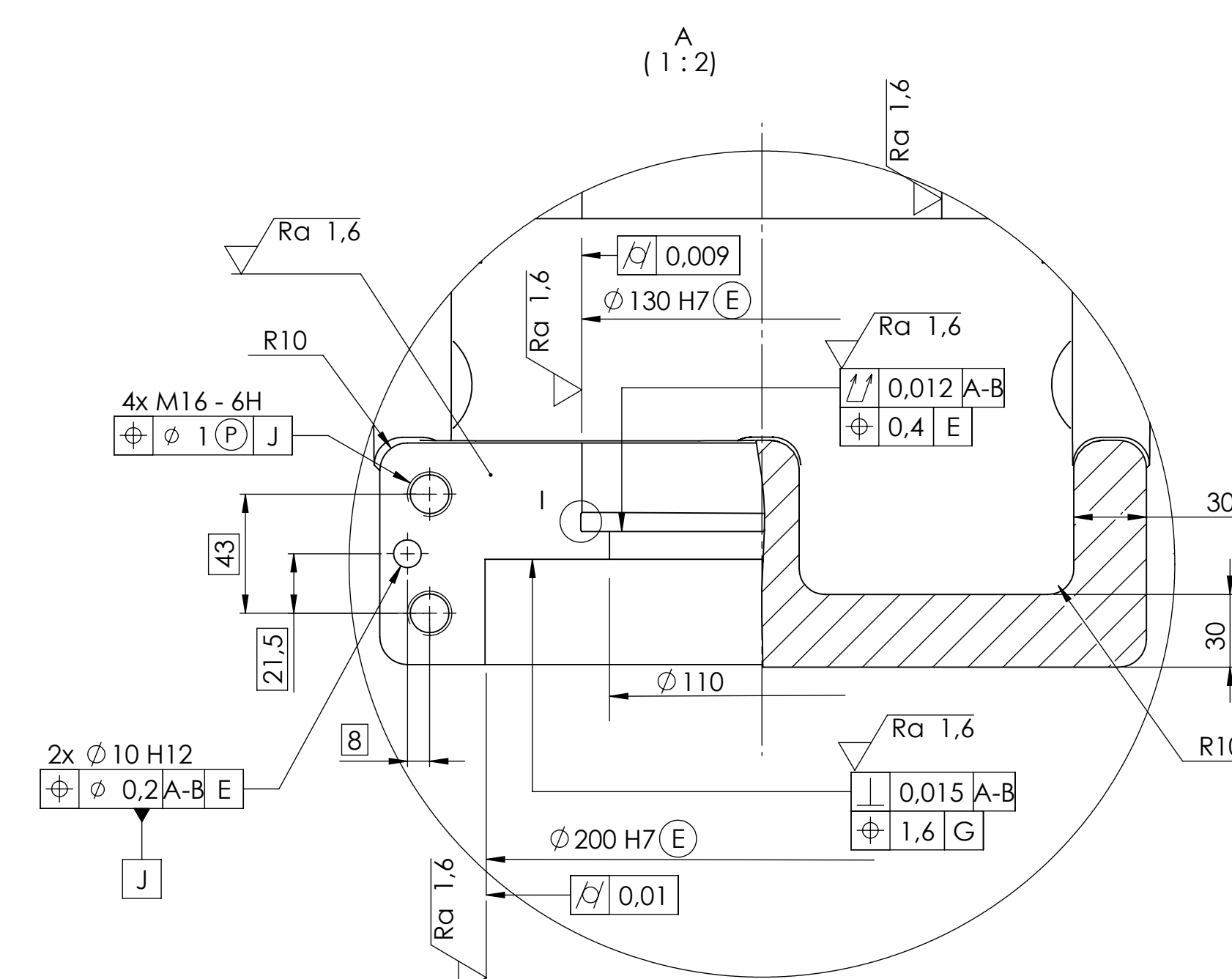
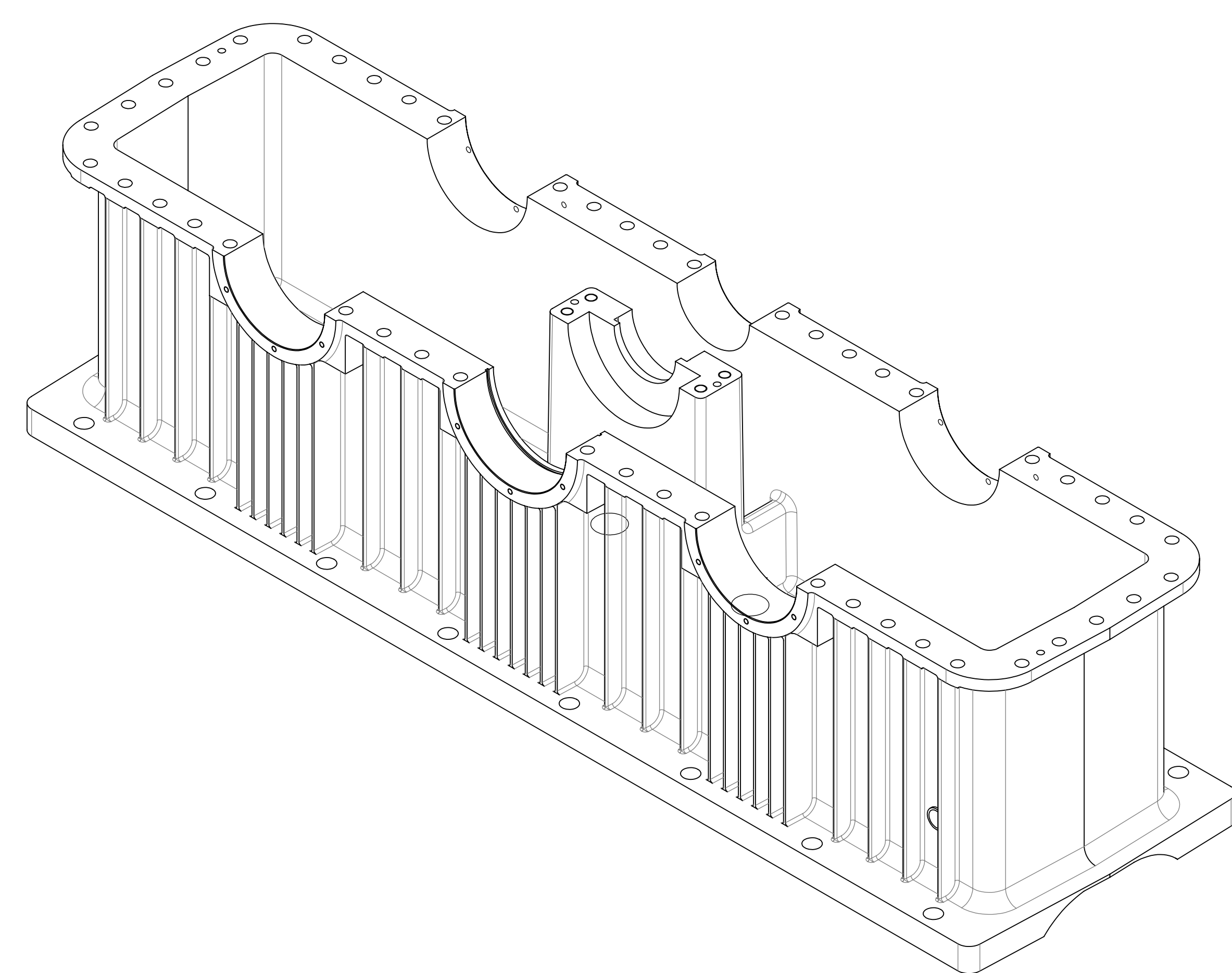
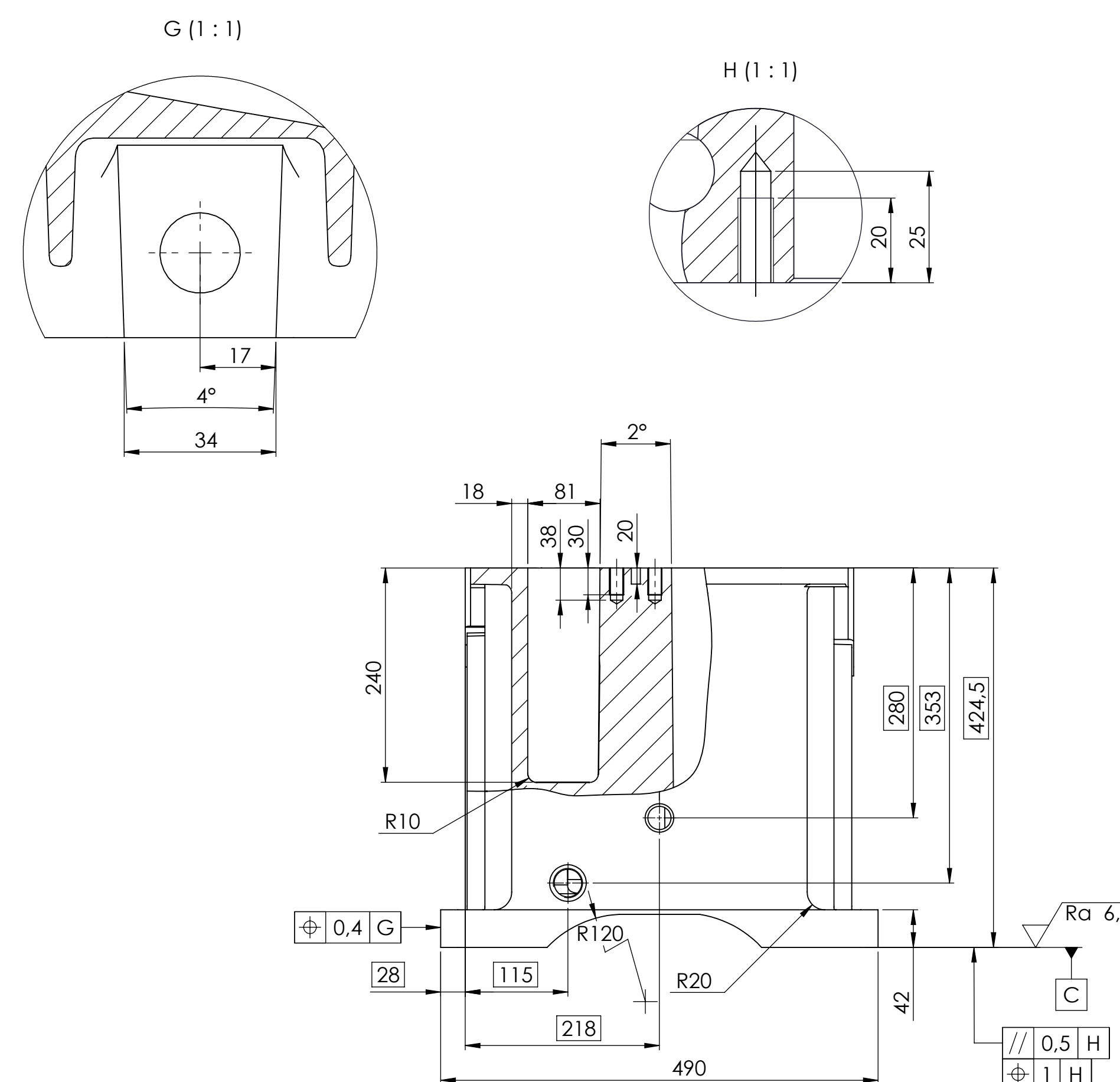
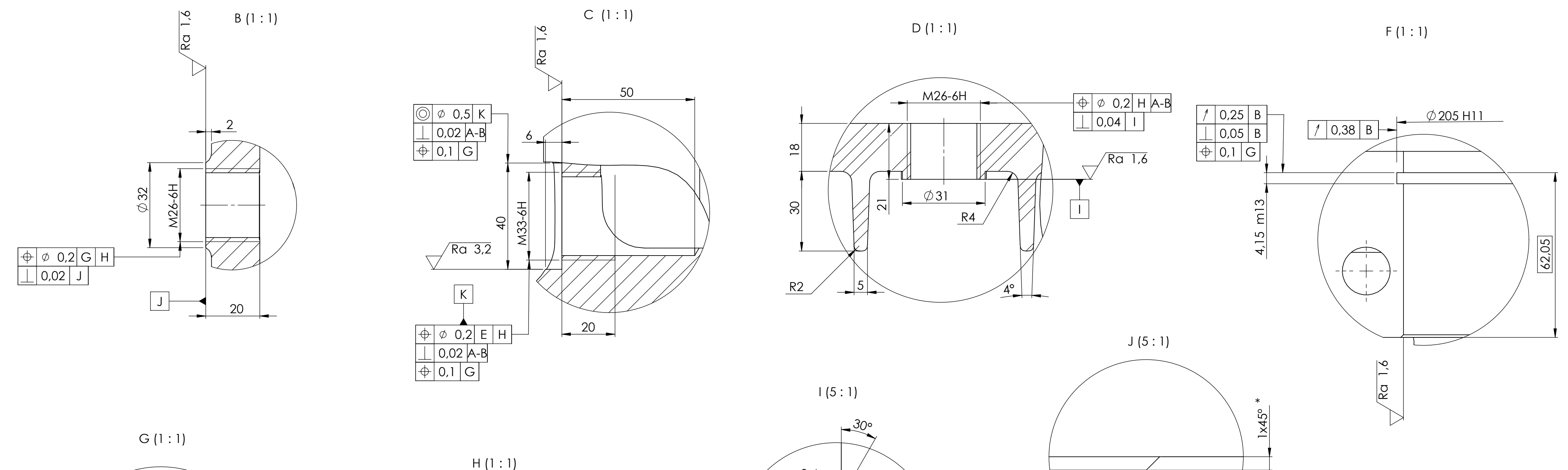
$\sqrt{\text{Ra } 25} \quad (\checkmark)$

\* Dimensões obtidas no fabrico após montagem na metade inferior.

|   |            |  |   |  |  |  |
|---|------------|--|---|--|--|--|
| Escala<br>1:2   |            | Toleranciamento ISO 8015<br>Tolerâncias gerais 2768 - mH<br>Tolerâncias gerais 8062 - DCTG 10 - GCTG 5 |   |  | Material Ferro fundido nodular (GGG50) |  |
|  |            |  |   |  | Massa 9 Kg                             |  |
|   | Data       | Nome   | Folha de desenho<br><br>ISO 5457 - A3 - OP100 - F                     |  |  |  |
| Criado  | 2019-05-19 | Mauro Filipe Rodrigues Domingues   |   |  |  |  |
| verificado  |            |  |   |  |  |  |
| Aprovado  |            |  |   |  |  |  |
| Departamento responsável<br>DEMec   |            | Referência técnica   | Tipo de documento<br>Desenho de definição                             |  |  | Estado do documento<br>Em curso de aprovação |
| Proprietário legal<br>FEUP  |            |  | Título: Título adicional<br>Posição<br>Componente 16 do des. conjunto |  |  | Número 20190519-16RV                         |
|   |            |  |   |  |  | Rev. A                                       |
|   |            |  |   |  |  | Data de edição 2019-05-19                    |
|   |            |  |   |  |  | Língua pt                                    |
|   |            |  |   |  |  | Folha 1/1                                    |

[illegible]

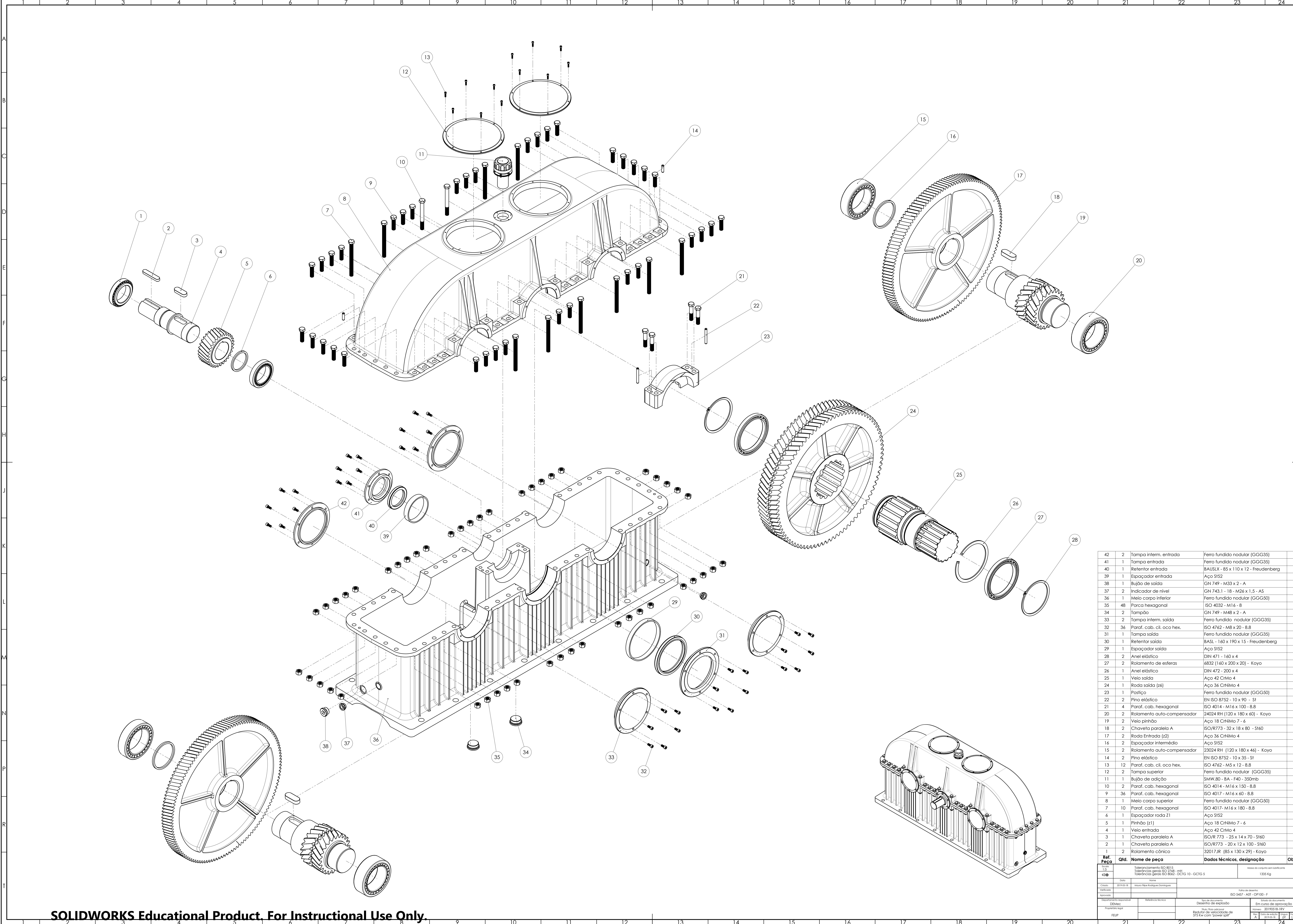




*Página intencionalmente em branco*

### E.3 Desenho de conjunto em vista explodida





| Ref. Peça | Qtd. | Nome de peça               | Dados técnicos, designação           | Obs. |
|-----------|------|----------------------------|--------------------------------------|------|
| 42        | 2    | Tampa intern. entrada      | Ferro fundido nodular (GGG35)        |      |
| 41        | 1    | Tampa entrada              | Ferro fundido nodular (GGG35)        |      |
| 40        | 1    | Retentor entrada           | BAUSLX - 85 x 110 x 12 - Freudenberg |      |
| 39        | 1    | Espaçador entrada          | Aço S152                             |      |
| 38        | 1    | Bujão de saída             | GN 749 - M33 x 2 - A                 |      |
| 37        | 2    | Indicador de nível         | GN 743.1 - 18 - M26 x 1,5 - AS       |      |
| 36        | 1    | Meio corpo inferior        | Ferro fundido nodular (GGG50)        |      |
| 35        | 48   | Parca hexagonal            | ISO 4032 - M16 - 8                   |      |
| 34        | 2    | Tampão                     | GN 749 - M48 x 2 - A                 |      |
| 33        | 2    | Tampa intern. saída        | Ferro fundido nodular (GGG35)        |      |
| 32        | 36   | Paraf. cab. cil. oco hex.  | ISO 4762 - M8 x 20 - 8.8             |      |
| 31        | 1    | Tampa saída                | Ferro fundido nodular (GGG35)        |      |
| 30        | 1    | Retentor saída             | BASL - 160 x 190 x 15 - Freudenberg  |      |
| 29        | 1    | Espaçador saída            | Aço S152                             |      |
| 28        | 2    | Anel elástico              | DIN 471 - 160 x 4                    |      |
| 27        | 2    | Rolamento de esferas       | 6832 (160 x 200 x 20) - Koyo         |      |
| 26        | 1    | Anel elástico              | DIN 472 - 200 x 4                    |      |
| 25        | 1    | Veio saída                 | Aço 42 CrNiMo 4                      |      |
| 24        | 1    | Roda saída (z6)            | Aço 36 CrNiMo 4                      |      |
| 23        | 1    | Postiço                    | Ferro fundido nodular (GGG50)        |      |
| 22        | 2    | Pino elástico              | EN ISO 8752 - 10 x 90 - S1           |      |
| 21        | 4    | Paraf. cab. hexagonal      | ISO 4014 - M16 x 100 - 8.8           |      |
| 20        | 2    | Rolamento auto-compensador | 24024 RH (120 x 180 x 60) - Koyo     |      |
| 19        | 2    | Veio pinhão                | Aço 18 CrNiMo 7 - 6                  |      |
| 18        | 2    | Chaveta paralela A         | ISO/R773 - 32 x 18 x 80 - S160       |      |
| 17        | 2    | Roda Entrada (z2)          | Aço 36 CrNiMo 4                      |      |
| 16        | 2    | Espaçador intermédio       | Aço S152                             |      |
| 15        | 2    | Rolamento auto-compensador | 23024 RH (120 x 180 x 46) - Koyo     |      |
| 14        | 2    | Pino elástico              | EN ISO 8752 - 10 x 35 - S1           |      |
| 13        | 12   | Paraf. cab. cil. oco hex.  | ISO 4762 - M5 x 12 - 8.8             |      |
| 12        | 2    | Tampa superior             | Ferro fundido nodular (GGG35)        |      |
| 11        | 1    | Bujão de adição            | SMW.80 - 8A - F40 - 350mb            |      |
| 10        | 2    | Paraf. cab. hexagonal      | ISO 4014 - M16 x 150 - 8.8           |      |
| 9         | 36   | Paraf. cab. hexagonal      | ISO 4017 - M16 x 60 - 8.8            |      |
| 8         | 1    | Meio corpo superior        | Ferro fundido nodular (GGG50)        |      |
| 7         | 10   | Paraf. cab. hexagonal      | ISO 4017 - M16 x 180 - 8.8           |      |
| 6         | 1    | Espaçador roda Z1          | Aço S152                             |      |
| 5         | 1    | Pinhão (z1)                | Aço 18 CrNiMo 7 - 6                  |      |
| 4         | 1    | Veio entrada               | Aço 42 CrNiMo 4                      |      |
| 3         | 1    | Chaveta paralela A         | ISO/R 773 - 25 x 14 x 70 - S160      |      |
| 2         | 1    | Chaveta paralela A         | ISO/R773 - 20 x 12 x 100 - S160      |      |
| 1         | 2    | Rolamento cônico           | 32017JR (85 x 130 x 29) - Koyo       |      |

|                            |  |   |                                    |
|----------------------------|--|---|------------------------------------|
| Nome                       | Tolerância conforme ISO 8013                   | Massa do conjunto sem lubrificante            | 1335 Kg                            |
| U.S.                       | Tolerâncias gerais ISO 2768 - mH               |   |                                    |
| CS                         | Tolerâncias gerais ISO 8062 - OCTG 10 - OCTG 5 |   |                                    |
| Criado                     | 2019-03-18                                     | Nome  | Miguel Ribeiro Rodrigues Domingues |
| Verificado                 |  | Título de desenho                             |                                    |
| Aprovado                   |  | ISO 5457 - A2D - CP100 - F                    |                                    |
| Desenvolvimento repetitivo |  | Seu documento                                 | Em curso de aprovação              |
| DEMAC                      |  | Desenho de exploração                         |                                    |
| Procedimento geral         |  | Revisão                                       | 20190318-RV                        |
| FEUP                       |  | Revisor de velocidade de 320 Rev com 10mm 40H |                                    |
|                            |  | Rev   | A                                  |
|                            |  | Proj  | 17                                 |
|                            |  | Des   | 17                                 |